Konstruktive Sicherheitseinrichtungen für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung

Th. Püster, D. Herzog, M. Hustedt



Forschung
Projekt F 2158

Th. Püster
D. Herzog
M. Hustedt

Konstruktive Sicherheitseinrichtungen für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung

Dortmund/Berlin/Dresden 2011

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Konstruktive Sicherheitseinrichtungen für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung“ – Projekt F 2158 – im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Dipl.-Ing. Thomas Püster
Dr.-Ing. Dirk Herzog
Dr. rer. nat. Michael Hustedt
Laser Zentrum Hannover e.V.
Hollerithallee 8, 30419 Hannover

Titelfoto: Uwe Völkner, Fotoagentur FOX, Lindlar/Köln

Umschlaggestaltung: Rainer Klemm
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herstellung: Bonifatius GmbH, Paderborn

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Friedrich-Henkel-Weg 1 − 25, 44149 Dortmund
Telefon 0231 9071-0
Fax 0231 9071-2454
poststelle@baua.bund.de
www.baua.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40 − 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Fax 030 51548-4170

Dresden:
Fabricestr. 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Fax 0351 5639-5210

Aus Gründen des Umweltschutzes wurde diese Schrift auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt.

ISBN 978-3-88261-133-5

Inhaltsverzeichnis

Seite

Kurzreferat 7

Abstract 8

1 Einleitung 9

2 Derzeitiger Erkenntnisstand im Bereich konstruktiver Sicherheitseinrichtungen für handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung 12
2.1 Beurteilung des Status-quo anhand von Veröffentlichungen, Patenten und am Markt verfügbarer Geräte 12
2.2 Stand der Normung im Bereich konstruktiver Sicherheitseinrichtungen für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung 20
2.3 Schlussfolgerungen und Formulierung des Entwicklungsbedarfs 21

3 Theoretische Betrachtung der Anforderungen an konstruktive Sicherheitseinrichtungen von HLG 22
3.1 Strategie der Risikominderung 22
3.1.1 Verfahren der Risikobeurteilung 24
3.2 Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung für ausgewählte Beispiele von handgeführten Lasern zur Materialbearbeitung 28
3.2.1 Vorhersehbare Maximalbestrahlungen in vorhersehbaren Fehlerbedingungen an Körperteilen 28
3.2.2 Zulässige maximale Abschaltzeiten (Nachlauf) für die Isolation der Laserstrahlung 31
3.2.3 Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung anhand der erforderlichen Performance Level (PL_r) 45
3.3 Bestimmung des erforderlichen Performance Levels (PL_r) 49
3.3.1 Rückschlüsse aus der Bestimmung der erforderlichen Performance Level (PL_r) 49
3.3.2 Ermitteln der sicherheitstechnischen Qualität der SRP/CS anhand des PL 49

4 Lösungsansätze für konstruktive Sicherheitseinrichtungen für HLG 51
4.1 Identifizieren notwendiger Sicherheitsfunktionen und deren Eigenschaften 51
4.2 Sicherheitskonzepte zur Isolierung der Laserstrahlung 55
4.2.1 Positions-/Aufsatzkontrolle 55
4.2.2 Lagekontrolle 55
4.2.3 Bewegungskontrolle 55
4.2.4 Freigabekontrolle/Zustimmtaster 56
4.2.5 Strahlführungsüberwachung 56
4.3 Gestaltung sicherer Steuerungen 56

5 Ausgewählte und qualifizierte sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen 61
5.1 Funktionsträger 61
5.1.1 Sensoren 64
5.1.2 Grenzwertschalter, Fensterdiskriminatoren 65

5.1.3	Zustimmungstaster	65
5.2	Sicherheitssteuerung	66
5.2.1	Architektur der Steuerung von HLG	66
5.2.2	Funktionale Aspekte	67
5.2.2.1	Sicherheitsbezogene Stopp-Funktion, eingeleitet durch eine Schutzeinrichtung	67
5.2.2.2	Start-/Wiederanlauffunktion	69
5.2.2.3	Vermeidung des unerwarteten Anlaufs	70
5.2.2.4	Zweihandschaltung/Zustimmungsfunktion	74
5.2.2.5	Funktion zum Stillsetzen im Notfall (NOT-HALT, NOT-AUS)	80
5.2.2.6	Schwankungen, Verlust und Wiederkehr der Energiequellen/Unterspannungsschutz	82
5.2.2.7	Sicherheitsbezogene Parameter (Parametrisierung)	84
5.2.3	Leistungskriterien (Performance Level, Systemreaktionszeit)	85
5.3	Prüfanordnungen	88
5.3.1	Prüfaufbau zur Qualifizierung von Lage und Beschleunigungssensoren	88
5.3.2	Prüfanordnung zur Qualifizierung von Auflagesensoren sowie Lage-/Beschleunigungssensoren in der Praxisanwendung (Warzenblech)	90
5.3.3	Prüfanordnung zur Qualifizierung von ausgewählten Sensoren bei der Lasermaterialbearbeitung	92
5.3.4	Prüfanordnung zur Qualifizierung von Sensoren zur Überwachung der Strahlführung	93
6	Ergebnisse der Untersuchungen	96
6.1	Qualifizierung der Sensoren anhand des Signalverhaltens	96
6.1.1	Mechanischer Taster	96
6.1.2	Induktive Sensoren	97
6.1.3	Kapazitive Sensoren	97
6.1.4	Ultraschallsensor	97
6.1.5	Lage- und Beschleunigungssensoren	98
6.2	Qualifizierung von Auflagesensoren sowie Lage-/ Beschleunigungssensoren in der Praxisanwendung	100
6.2.1	Berührungslose Auflagesensoren	100
6.2.2	Beschleunigungssensoren Auflagesensoren	103
6.3	Qualifizierung von ausgewählten Sensoren bei der Lasermaterialbearbeitung	105
6.4	Qualifizierung von Sensoren zur Überwachung der Strahlführung	107
6.5	Qualifizierung der Sicherheitssteuerungen	115
6.5.1	Systemreaktionszeiten	115
7	Bewertung der Ergebnisse	121
7.1	Eignung verschiedener Sensoren	121
7.2	Eignung weiterer sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen	128
7.3	Schlussfolgerungen	130
7.4	Transfer in technische Regelungen/Prüfvorschriften	132
8	Zusammenfassung	134
9	Ausblick	137

10 Literaturverzeichnis 139

11 Abbildungsverzeichnis 147

12 Tabellenverzeichnis 150

13 Abkürzungen und Formelzeichen 151

Danksagung 153

Anhang 1 Hersteller von HLG und Dienstleister 154

Anhang 2 Klassifikation der Gefährdungen bei HLG (allgemein) 155

Anhang 3 Erforderliche Performance Level (PL_r) 159

Anhang 4 Risikographen 164

Anhang 5 Vorschläge für Prüfverfahren 165

Anhang 6 Checklisten für Hersteller und Benutzer 172

Anhang 7 Beispiel für die Anwendung der Software SISTEMA (IFA der DGUV 2010) 178

Konstruktive Sicherheitseinrichtungen für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung

Kurzreferat

Die Anwendungen von Geräten zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung (HLG) nehmen kontinuierlich zu. Ausgehend von Geräten zum Feinschweißen werden HLG heute unter anderem zum Schweißen, Schneiden, Auftragschweißen, Härten und Reinigen eingesetzt. Die Einsatzfelder der HLG sind unter anderem der Automobilbau, der Maschinen- und Werkzeugbau sowie seit kurzem der Schiffbau. Darüber hinaus werden HLG auch in der Kunstrestaurierung und Denkmalpflege genutzt.

Die Sicherheit von HLG ist eine grundlegende Anforderung. Jedoch gibt es hinsichtlich der sicherheitsgerechten Konstruktion sowie des sicheren Betriebs eine Reihe offener Fragestellungen. Die in diesem Bericht zusammengefassten Ergebnisse leisten einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit zukünftig zu entwickelnder HLG. Startpunkt ist eine Bestandsaufnahme bzgl. konstruktiver Sicherheitseinrichtungen, welche derzeit bei HLG für die industrielle Materialbearbeitung Verwendung finden, sowie eine theoretische Betrachtung der Anforderungen an konstruktive Sicherheitseinrichtungen von HLG für die Materialbearbeitung inkl. Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung sowie Ermittlung der erforderlichen Performance Level (PL_r) der unterschiedlichen Sensoren bzw. der sicherheitsbezogenen Bauteile der Steuerung (Safety Related Parts of Control Systems, SRP/CS). Darauf aufbauend werden Ansätze für konstruktive Sicherheitseinrichtungen von HLG vorgestellt. Dazu gehören Sicherheitskonzepte für die Isolierung der Laserstrahlung sowie die konstruktive Gestaltung sicherer Steuerungen (Steuerungsarchitektur).

An ausgewählten Sensoren werden mit einer im Rahmen der Arbeiten aufgebauten Sicherheitssteuerung für den Funktionsträger experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Dabei werden verschiedene Prüfanordnungen realisiert, um die Funktionalitäten der jeweils betrachteten Sensoren sowie der Sicherheitssteuerung zu analysieren. Die Qualifizierung der Komponenten und Systeme erfolgt sowohl offline anhand des Signalverhaltens und der Funktionalität als auch online unter Berücksichtigung der Wechselwirkung mit Laserstrahlung bei der Materialbearbeitung. Neben Auflage- und Abstandssensoren sowie Lage- und Beschleunigungssensoren werden auch Temperatursensoren zur Überwachung der Strahlführung behandelt.

Aus der Bewertung der Ergebnisse ergeben sich Vorschläge für Prüfverfahren zur Überprüfung der funktionalen Sicherheit von HLG zur Materialbearbeitung sowie Checklisten für Hersteller und Benutzer derartiger Geräte. Letztere bieten auf der einen Seite für Hersteller eine Hilfestellung für eine sichere Konstruktion von HLG hinsichtlich der Lasersicherheit, auf der anderen Seite ermöglichen sie Benutzern von HLG, sicherheitsrelevante Einrichtungen eines HLG zu verifizieren und richtig zu bedienen, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Schlagwörter:

Handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung, inhärente technische Schutzmaßnahmen, Sensoren, Sicherheitssteuerung

Technical safety measures for the use of hand-held laser processing devices

Abstract

The range of applications for hand-held laser processing devices (HLDs) is increasing steadily. Starting with precision welding, today, hand-held laser processing devices are available amongst others for welding, cutting, cladding, hardening and cleaning. The devices are used in the automotive, engineering and tool making industry, and newly in the shipbuilding industry. Also, hand-held laser systems are applied for art restoration and conservation.
The safety of hand-held laser processing devices is a fundamental requirement. However, a number of questions regarding both the safe design and the safe use of the devices are still open. The results which are summarised in this report are an important contribution to the improvement of safety of HLDs to be developed in future. Starting point of the work is a survey regarding protective design measures, which are actually used in HLDs for industrial laser material processing. Furthermore, a theoretical examination of requirements with respect to protective design measures of HLDs for material processing is performed, including hazard analysis and risk assessment as well as determination of Required Performance Level (PL_r) and Safety Related Parts of Control Systems (SRP/CS). Based on these considerations, approaches for the realisation of inherently safe design measures of HLDs are presented. This includes safety concepts for the isolation of the laser radiation and concepts for the design of safe control systems (control architecture).
Taking into account selected sensors, experimental investigations are performed, using a functional model which is realised in the frame of the work. Here, different test set-ups are realised in order to analyse the performance of the sensors and the safety-related control system. On the one hand, the qualification of the components and systems is done offline, regarding the signal performance and the functionality. On the other hand, the interaction with the laser radiation during the material processing is taken into account online. Apart from mechanical contact and distance sensors as well as position and acceleration sensors, temperature sensors used to monitor the beam guidance are examined.
Finally, the evaluation of the investigations results in proposals for testing methods to examine the functional safety of HLDs for material processing as well as in checklists for manufacturers and users of such devices. On the one hand, these checklists offer assistance to manufacturers in order to achieve a safe design of HLDs with regard to laser safety. On the other hand, they enable the users of HLDs to verify the technical protective systems and to handle these systems correctly, in order to ensure a safe use of the HLDs.

Key words:

Hand-held laser processing devices, inherent technical protective design measures, sensors, safety controls (Programmable Logic Controller – PLC)

1 Einleitung

Die in diesem Bericht betrachteten handgeführten oder handpositionierten Lasergeräte zur Materialbearbeitung (HLG) sind Maschinen bzw. Handwerkzeuge, an die komplexe Sicherheitsanforderungen gestellt werden, um einen sicheren und gefahrlosen Umgang mit ihnen zu ermöglichen.

Insbesondere direkte oder von spiegelnden Oberflächen z. B. Werkstückoberflächen gerichtet reflektierte Laserstrahlung kann für den Bediener aber auch für Personen im Arbeitsbereich eine erhebliche Gefährdung für Haut und Augen darstellen.

Seit Mitte der 90er Jahre hat die Entwicklung von Geräten zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung (HLG) kontinuierlich technische Fortschritte erzielt und neue Anwendungsfelder erschlossen [KEI98, NEU04, SCH06]. HLG stellen eine technisch innovative Ergänzung zu automatisierten Laseranlagen dar, die immer dann vorteilhaft gegenüber automatisierten Anlagen eingesetzt werden können, wenn:

- komplexe und/oder immobile Bauteile mit hoher Flexibilität lokal und präzise vor Ort bearbeitet werden sollen,
- auf aufwändige Handhabungstechnik und Programmierung verzichtet werden soll, weil z. B. nur geringe Losgrößen zu bearbeiten sind.

<u>Einsatzgebiete von HLG</u>
Den Ausgangspunkt von Geräten zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung stellen Lasereinrichtungen zum Feinschweißen dar, wie sie in der Schmuckindustrie und im Dentalbereich seit mehr als 10 Jahren eingesetzt werden. Bei diesen Laser-Handarbeitsplätzen handelt es sich je nach Gerätedesign um einen geschlossenen oder offenen Bearbeitungsbereich, in den der Bediener eingreift und das Werkstück relativ zum ortsfesten Laserstrahl manuell positioniert und bewegt [ALB98].

Mit der Verfügbarkeit von mobilen, leistungsfähigen und kompakten Festkörper-, Dioden- und Faserlasern in Kombination mit Strahlführungssystemen über optische Fasern [SCH02, NEU04] haben sich eine Reihe neuer Anwendungsfelder von HLG insbesondere im industriellen Sektor entwickelt. Bei diesen mobilen Geräten wird der Laserstrahl bzw. das HLG relativ zum ortsfesten Werkstück handgeführt oder -positioniert. Eingesetzt werden HLG zum Schneiden, zum Schweißen [HAF04], für die Oberflächenbearbeitung, wie Auftragschweißen, Löten und Härten [BER04] sowie zum Abtragen bzw. Reinigen [BRU02, PAN06]. Die Einsatzfelder der HLG sind unter anderem der Automobilbau, der Maschinen- und Werkzeugbau, der Rückbau komplexer immobiler Anlagen sowie die Denkmalpflege. Erste Anwendungen im Schiffbau verdeutlichen das Potenzial von HLG [JAS06a, JAS08]; der Einsatz von HLG für den Fassadenbau (auf Baustellen) ist geplant. Im Bereich der Kunstrestaurierung und Denkmalpflege führte die Entwicklung zu sehr kompakten, z. T. energieautarken, tragbaren Lasereinrichtungen in Verbindung mit HLG [BAR06]. In Abb. 1.1 sind derzeitige und geplante Anwendungsbereiche von HLG dargestellt.

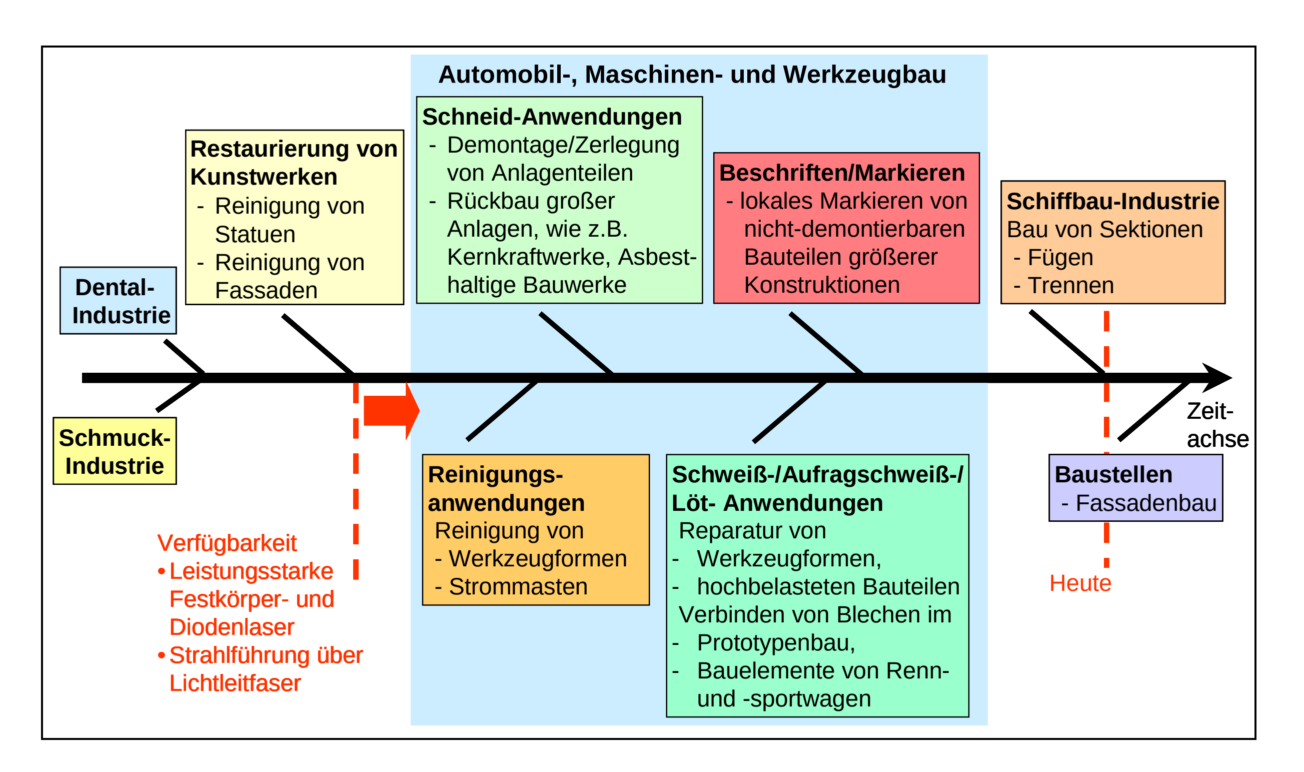


Abb. 1.1 Anwendungsbereiche von HLG

Während in den ersten Jahren insbesondere von Forschungsinstituten Prototypen entwickelt wurden, bieten mittlerweile eine Reihe von Firmen (überwiegend kleine und mittlere Unternehmen, KMU) Geräte zur handgeführten und/oder handpositionierten Laser-Materialbearbeitung an. Auch wird die Anwendung der HLG als Dienstleistung angeboten, wobei die ausführenden Firmen in der Regel mit mobilen Laseranlagen vor Ort gehen und die Bearbeitung im Haus des Auftraggebers durchführen.

Geräte zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung sind von ihrer Stellung auf dem Lasermarkt derzeit noch den Nischenprodukten zuzuordnen. Lasergeräte (Strahlquellen) für HLG, die ebenfalls einer ständigen Weiterentwicklung unterliegen, zählen zu den typischen Laserprodukten am Markt. Marktstudien verdeutlichen, dass sich der weltweite Markt für Lasertechnologie in einem stetigen Wachstum befindet. Während im Jahr 2003 die Gesamteinnahmen von Lasersystemen ein Wachstum von ca. 5 % erreichten, wuchsen die Märkte für Nischenprodukte (Anteil von 20 % des Gesamtmarktes) überproportional [BEL03]. Das Marktvolumen für Lasersysteme zur Materialbearbeitung stieg von 3,7 Mrd. Euro im Jahr 2003 auf 6,4 Mrd. Euro im Jahr 2008 [MAY09]. Dieses unterstreicht das Wachstumspotenzial der HLG bzw. der Gesamtsysteme. Die große Bedeutung der optischen Technologien und speziell der Lasertechnik für die wirtschaftliche Entwicklung insbesondere in Deutschland wird z. B. in [BMBF09] dargestellt.

Gefährdungen/Status Quo

Die Mehrzahl der HLG wird für 3-D-Anwendungen eingesetzt; eine vollständige Kapselung der Prozesszone zur lokalen Abschirmung der Laserstrahlung ist daher oftmals nicht möglich und im Hinblick auf die beabsichtigte Funktion kontraproduktiv [SCH01]. Nur wenige Geräte verfügen über technische Sicherheitseinrichtungen (u. a. Aufsatz-, Abstandskontrolle) zur Reduzierung des Risikos [HAF02, HAF02a, BAR06]. Verfahrensbedingt wird im bestimmungsgemäßen Betrieb bei den meisten HLG-Anwendungen gestreute Laserstrahlung zugänglich (in einigen Fällen gerichtet

reflektierte Strahlung) [RAS06]. In vorhersehbaren Fehlerfällen wie auch bei vorhersehbarem Missbrauch kann jedoch gerichtet reflektierte Laserstrahlung sowie direkte Laserstrahlung zugänglich werden. Anders als konventionelle Handwerkzeuge (z. B. Handbohrmaschine, Bolzentreibgerät) weisen HLG je nach Strahlformung und Freiheitsgraden der Strahlaustrittsebene sowie Reflexionsbedingungen der zu bearbeitenden Werkstücke einen weiten Wirk- und damit Gefährdungsbereich auf.

Das Maß der Gefährdung wird dabei wesentlich durch die leistungsführenden Parameter eines HLG bestimmt. Je nach Anwendung variieren die mittleren Ausgangsleistungen von einigen Watt bis zu mehreren Kilowatt. In Abhängigkeit von der Ausgangsleistung, den strahlformenden Optiken und den Bearbeitungsbedingungen kann eine Überschreitung der maximal zulässigen Bestrahlungswerte für ungeschützte Augen (MZB_{Auge}) und für die nackte Haut (MZB_{Haut}) gemäß DIN EN 60825-1 nicht sicher ausgeschlossen werden.

In diesem Bericht wird zunächst in Abschnitt 2 eine Bestandsaufnahme bzgl. konstruktiver Sicherheitseinrichtungen, welche derzeit bei HLG für die industrielle Materialbearbeitung Verwendung finden, durchgeführt. Ergänzt wird diese Betrachtung durch den Stand der Normung im Bereich der handgeführten Lasermaterialbearbeitung. Auf Basis der Bestandsaufnahme wird der Forschungsbedarf für das hier dargestellte Projekt definiert.

Abschnitt 3 beinhaltet eine theoretische Betrachtung der Anforderungen an konstruktive Sicherheitseinrichtungen von HLG für die Materialbearbeitung. Dabei wird insbesondere anhand ausgewählter Beispiele eine Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung durchgeführt. Außerdem werden die erforderlichen Performance Level (PLr) der unterschiedlichen Sensoren bzw. der sicherheitsbezogenen Bauteile der Steuerung (Safety Related Parts of Control Systems, SRP/CS) bestimmt.

In Abschnitt 4 werden Lösungsansätze für konstruktive Sicherheitseinrichtungen von HLG vorgestellt und diskutiert. Dazu gehören Sicherheitskonzepte für die Isolierung von Laserstrahlung sowie die konstruktive Gestaltung sicherer Steuerungen (Steuerungsarchitektur).

In Abschnitt 5 werden die für die experimentellen Untersuchungen ausgewählten Sensoren sowie der Aufbau der Sicherheitssteuerung für den Funktionsträger beschrieben. Der Funktionsträger wird in verschiedenen Prüfanordnungen eingesetzt, um die Funktionalitäten der jeweils betrachteten Sensoren sowie der Sicherheitssteuerung analysieren zu können.

Die Ergebnisse der mit den ausgewählten Sensoren und Steuerungen durchgeführten Untersuchungen werden in Abschnitt 6 dargestellt. Dabei wird die Qualifizierung der Komponenten und Systeme sowohl offline anhand des Signalverhaltens und der Funktionalität als auch online unter Berücksichtigung der Wechselwirkung mit Laserstrahlung bei der Materialbearbeitung durchgeführt. Neben den Auflage-/Abstandssensoren und den Lage- und Beschleunigungssensoren werden in diesem Abschnitt auch Temperatursensoren zur Überwachung der Strahlführung behandelt.

In den Abschnitten 7 und 8 werden die Ergebnisse abschließend bewertet und zusammengefasst. Darüber hinaus wird in Abschnitt 9 ein Ausblick auf die zukünftigen Entwicklungen im Bereich der Normung im Zusammenhang mit HLG unter Berücksichtigung der erhaltenen Projektergebnisse gegeben.

2 Derzeitiger Erkenntnisstand im Bereich konstruktiver Sicherheitseinrichtungen für handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung

Handgeführte und -positionierte Lasergeräte zur Materialbearbeitung (HLG) haben aufgrund der technischen Weiterentwicklung insbesondere von Dioden-, Festkörper- und Faserlasern an Bedeutung gewonnen. Die Kombination der HLG mit kompakten, leistungsfähigen Lasergeräten, die mobil eingesetzt werden können, sowie einer Strahlführung über Lichtleitfasern bietet für die verschiedensten Anwendungsbereiche eine flexible Alternative zu automatisierten Laseranlagen oder sie macht technische Lösungen sogar erst möglich.

Infolge der unterschiedlichen Anwendungsbereiche variieren die Ausgangleistungen über mehrere Größenordnungen. Durch die Betriebsarten (cw, gepulst) sowie durch den Einsatz unterschiedlichster strahlformender Optiken ergeben sich für den Bediener oder weitere Personen im Gefahrenbereich stark differierende Gefährdungen durch den zugänglichen Laserstrahl.

In allen Fällen ist der Konstrukteur/Hersteller des HLG gefordert, ein angepasstes Konzept zur Risikominderung umzusetzen, welches das Restrisiko für den Benutzer auf ein akzeptables Maß reduziert. Bei der Auswahl und Umsetzung konstruktiver, technischer, organisatorischer und persönlicher Schutzmaßnahmen ist den Vorgaben gesetzlicher sowie technischer Regeln zu folgen.

Um Aussagen über den derzeitigen Status-Quo insbesondere konstruktiver Sicherheitseinrichtungen für HLG treffen zu können, wurde eine breit angelegte Recherche durchgeführt. Sie umfasst:
- am Markt verfügbare HLG sowie Prototypen
- nationale und internationale Veröffentlichungen zu HLG
- internationale Patente in Bezug auf HLG.

Im Folgenden sind die gemäß dem geplanten Projektablauf bis Ende 2008 erarbeiteten Daten zusammengestellt, wobei in Bezug auf die Auflistungen kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden kann.

2.1 Beurteilung des Status-quo anhand von Veröffentlichungen, Patenten und am Markt verfügbarer Geräte

Recherchiert wurden nationale und internationale Dokumente. Mit Bezug zur Thematik stellen die Handlaser-Kolloquien (Deutschland, Halle/Saale) sowie internationale Konferenzen zur Lasermaterialbearbeitung (u. a. ICALEO) oder zur Restaurierung (u. a. LACONA) wichtige Informationsquellen dar. Auf diesen Veranstaltungen wie auch auf Messen (u. a. LASER World of PHOTONICS, München) können Prototypen oder am Markt verfügbare HLG in Augenschein genommen werden. Im Bereich der Fachzeitschriften finden sich die meisten Informationen u. a. in Laser, LaserPraxis, Laser Magazin, Stahl, Schweißen und Schneiden.

In der überwiegenden Anzahl von Veröffentlichungen im Bereich HLG werden primär die Anwendungen der HLG und die erzielbaren Prozessergebnisse ausführlich beschrieben. Die Darstellung der technischen Besonderheiten der Geräte bzw. die Erläuterung des Gerätekonzepts erfolgt in der Regel in deutlich geringerem Umfang.

Dieses bedingt, dass auch das Sicherheitskonzept bzw. die sicherheitstechnischen Einrichtungen des HLG nur oberflächlich beschrieben werden. Oftmals wird auf die Einordnung des HLG in die Laser Klasse 4 verwiesen und auf die Einrichtung von Laserbereichen und das Tragen von persönlicher Schutzausrüstung (Laserschutzbrillen) hingewiesen. Nur sehr vereinzelt findet eine detaillierte Beschreibung der konstruktiven technischen Sicherheitsmerkmale eines HLG statt.

Im Folgenden sind die in den Veröffentlichungen der Handlaser-Kolloquien, der ICALEO, der LACONA sowie Fachzeitschriften (siehe Literaturliste) genannten/erläuterten Konzepte bzw. sicherheitsbezogenen Einrichtungen nach Art aufgeführt:

<u>Laserschutzfilter</u>

- Beschrieben wird, dass eingehauste oder offene HLG, bei denen das zu bearbeitende Werkstück manuell zum Laserstrahl positioniert wird, zur Beobachtung der Prozesszone über in das Okular integrierte Laserschutzfilter verfügen. Inwieweit das Vorhandensein/die Position der Filter steuerungstechnisch überwacht wird, geht aus den Veröffentlichungen nicht hervor. Anhand der Manuals ist jedoch davon auszugehen, dass in den meisten Fällen nur administrative Regelungen getroffen werden und keine steuerungstechnische Positionsüberwachung erfolgt [ALB98, HAU98, HAF00].

<u>Faserstecker (HLG-seitig)</u>

- Erläutert wird, dass es aus ergonomischen Aspekten vorteilhafter ist, wenn der HLG-seitige Faserstecker um die Mittelachse drehbar ist [HAF98, KIM06]. Hierdurch können Verdrehungen – Torsionsspannungen – der Strahlführungsfaser (und unter Umständen nachfolgende Beschädigungen mit Strahlaustritt) weitgehend vermieden werden. Auch ist die Handhabung des HLG durch die erhöhte Bewegungsfreiheit leichter.

<u>Sensoren optisch</u>

- Abstandssensoren:
  Erläutert wird die Verwendung verschiedener optischer Abstandssensoren (Distanzsensor, Triangulationssensoren), um sicherzustellen, dass sich das zu bearbeitende Objekt in einem bestimmten Abstand zum HLG befindet. Detaillierte Beschreibungen zur Art des Messverfahrens und zum Sensortyp finden sich nicht. Unklar bleibt auch, welche Steuerungskategorie die Sensoren aufweisen und wie sie in die Sicherheitssteuerung des HLG eingebunden sind [WAG98, BUE98, HAF06, BRU02, BAR06].
- Streustrahlungsdetektor (HLG geräteintern):
  Beschrieben werden klein bauende Streustrahlungsdetektoren mit spektralen Empfangsbereichen für Laserstrahlung von Dioden-, Nd:YAG- sowie Faserlasern. Sie werden HLG geräteintern eingesetzt, um sicherzustellen, dass der optische Strahlweg nicht dejustiert ist; mit der Folge, dass Laserstrahlung das Gehäuse des HLG zerstören und austreten kann [HAF00, HAF02, HAF06].
- Streustrahlungsdetektor (Prozessbereichsüberwachung):
  Erläutert werden Streustrahlungsdetektoren, die am Außengehäuse des HLG montiert sind, um sicherzustellen, dass die vom Prozess im bestimmungsgemäßen Betrieb des HLG emittierte Streustrahlung bestimmte Werte nicht überschreitet [HEY00, HAF06]. Nicht beschrieben wird die Berücksichtigung von vorhersehbaren Fehlerfällen (direkte Strahlung, Strahlung mit gerichtet reflektierten

Anteilen, die nicht vom Sensor erfasst werden). Die Ausführung der Sensoren und Einbindung in die Sicherheitssteuerung erfolgt nicht.

- Umgebungslichtdetektor (HLG geräteintern):
  Beschrieben wird ein Verfahren zur Überwachung der Auflage und der Abschirmung eines HLG zur 2D-Bearbeitung (Markieren), das bei Aufliegen auf dem Werkstück zusammen mit dem Werkstück eine vollständig geschlossene Prozesszone bildet. Berücksichtigt im Sicherheitskonzept werden transparente Werkstücke, die Licht transmittieren, oder verbleibende Spalte, durch die Licht in die Prozesszone eindringt. Hierfür verfügt das HLG im Bereich der Abschirmung über einen entsprechenden Sensor. Die Ausführung der Sensoren, (insb. spektrale Empfindlichkeit in Bezug auf Vergleich mit entspr. Laserwellenlänge) und die Einbindung in die Sicherheitssteuerung (mit Angabe der Steuerungskategorie) wird nicht näher erläutert [KRA06].

<u>Sensoren (optisch für Laserstrahlung)</u>

- Bei einem HLG wird eine „Monitordiode“ zur Überwachung der Strahlführung beschrieben [EXN99]. Hierbei handelt es sich um eine Einrichtung zur Ausblendung (i. d. R. vor der letzten Optik) eines bestimmten Anteils der Laserstrahlung, die auf einen Sensor (u. a. thermischer Sensor, Halbleitersensor) geleitet wird. Durch Vergleich des Sensorsignals mit dem Ausgangswert der Laserstrahlung am externen Lasergerät können Fehler in der Strahlführung detektiert werden, bei Überschreiten bestimmter Schwellwerte wird die Laserstrahlung isoliert.

<u>Sensoren (Temperatur)</u>

- Einige HLG verfügen über Temperatursensoren zur Überwachung der Strahlführung und optischer Elemente [HAF00, HAF02, BER04, HAF06, HEN06]. Die Sensoren befinden sich im HLG-Gehäuse und dienen zur Erkennung von Fehlern in der Strahlführung (Laserstrahlung wird absorbiert und Bauteile erwärmen sich), die dazu führen können, dass Laserstrahlung das Gehäuse des HLG zerstören und austreten kann. Die Auslegung der Sensoren und ihre Einbindung in die Sicherheitssteuerung werden nicht näher beschrieben.

<u>Sensoren (Druck)</u>

- Einige wenige Aufsatzgeräte für 2D-Applikationen (Markieren, Schweißen), die in Kombination mit dem zu bearbeitenden Werkstück eine vollständig gekapselte Prozesszone bilden („Laserklasse 1“), verfügen u. a. über Drucksensoren zur Aufsatzkontrolle [BAE06, KRA06]. Hierdurch können verbleibende/entstehende Spalte (durch die ein Gasaustausch stattfindet und infolge dessen es zu Druckveränderungen in der Prozesszone kommt) detektiert werden. Die Auslegung der Sensoren und ihre Einbindung in die Sicherheitssteuerung werden jedoch nicht näher beschrieben.

<u>Sensoren elektromechanisch</u>

- Vorgestellt werden Kontakt-/Auflagesensoren, die mittels einem oder mehreren federbelasteten Stiften auf dem Werkstück aufliegen. Die Position des Stiftes wird mit verschiedenen Verfahren/Sensoren (u. a. mechanisch, induktiv, kapazitiv) gemessen. Es wird nicht beschrieben, welche Steuerungskategorie die Sensoren aufweisen und wie sie in die Sicherheitssteuerung eingebunden sind [HAF98, HEY00, HAF00, JAS02, HAF02, HEY02, BER04, EXN06, HAF06, BAE06, KRA06].

Sensoren elektrisch

Sensoren mit elektrischem Wirkprinzip, die als direkte Kontakt-/Auflagesensoren verwendet werden:

- Erläutert werden Systeme mit einer Kontaktnadel oder einem Stift mit codiertem (moduliertem) Stromfluss über das HLG, Stift und Werkstück; dieses System funktioniert nur bei metallischen (elektrisch leitenden) Werkstücken [SCH02, SCH04].
- Zum anderen werden induktive oder kapazitive Sensoren als direkt messende Systeme des Abstands HLG/Werkstück eingesetzt [ORL02, HEY02, GUE04, PET06]. Induktive Sensoren sind beschränkt auf metallische Werkstücke, kapazitive Sensoren können auch für andere Werkstoffe eingesetzt werden.

Bedienungselemente (für Strahlfreigabe)

- Fußschalter/-taster:
  Einige Geräte, insbesondere solche, bei denen das Werkstück mit Händen gehalten wird, oder bei denen Zusatzmaterial mit einer Hand zugeführt wird, verfügen über einen Fußschalter [ASM99, KNE02]. Die Auslegung der Schaltung und die Einbindung in die Sicherheitssteuerung werden in der Regel nicht näher beschrieben.
- Einfingerschaltung:
  Einige HLG-Geräte verfügen über eine Einfinger-Betätigung (Taster); insbesondere solche, bei denen das Werkstück oder Zusatzmaterial mit der zweiten Hand zugeführt wird [WIE95, WEK95, ASM99, SCH02, SAL03, WIE03, GUE04, SCH04, AGN05, BAR06]. Um das Risiko ungewollter Strahlfreigaben zu verringern, werden sog. Zustimmtaster eingesetzt; dieses bedeutet, dass die Befehle (des Tasters) in bestimmter zeitlicher Abfolge betätigt werden müssen (Überwachung der Signalabfolge). Die Auslegung der Schaltung und die Einbindung in die Sicherheitssteuerung werden in der Regel nicht näher beschrieben.
- Zweihandschaltung:
  Gemäß Beschreibung verfügen mehrere Geräte über Zweifingerschaltungen. Von einer Auslegung als „Zustimmtaster“ wird vereinzelt berichtet, d. h. dass die Taster in einer bestimmten zeitlichen Abfolge betätigt werden müssen (s. o.). Die Auslegung der Schaltung und die Einbindung in die Sicherheitssteuerung werden in der Regel nicht näher beschrieben [WAG98, HAF00, SCH02, HAF02, HEY02, EXN06].
- Zweihandsicherheitsschaltung:
  Nur in Einzelfällen wird eine normkonforme Zweihandsicherheitsschaltung (DIN EN 574) verwendet und entsprechend in die Sicherheitssteuerung eingebunden [BER04, HEN06].

Strahlisolierung (Sicherheitsstrahlverschluss/Abschaltung der Energieversorgung)

- In den meisten Fällen wird in Bezug auf die Laserstrahlisolierung auf den lasergeräteseitigen Strahlverschluss oder auf die Abschaltung der Energieversorgung (elektrische Spannung) des Lasergerätes verwiesen. Nur in vereinzelten Fällen verfügt das HLG über einen integrierten eigenen Shutter. Die Auslegung des Shutters (gem. DIN EN 60825-1 und DIN EN ISO 11553-1; ausfallsicher, bei Störung selbst schließend, in geschlossener Stellung leicht verriegelbar, mit Positionsanzeige) und die Einbindung in die Sicherheitssteuerung wird in der Regel nicht näher beschrieben [HEY00, HAF02, EXN06, BAE06].

Steuerung (Sicherheitssteuerung)

- Sicherheitsrelais:
  Bei einer Reihe von HLG werden die sicherheitsbezogenen Signale mit Hilfe von Sicherheitsbausteinen (z. B. Pilz PNOZ) ausgewertet. Oftmals beschränkt sich dieses allerdings auf die -NOT-AUS-Steuerung; in der Regel wird die Stopp-Kategorie nicht angegeben. Auch die in Verbindung mit den Sensoren und Aktuatoren erzielbare Steuerungskategorie wird in der Mehrzahl nicht genannt [BUT98, HEY00, HEY02, GUE04].
- Microcontroller:
  Bei verschiedenen HLG ist die Prozessüberwachung bzw. die Signalverarbeitung mit Hilfe eines Microcontrollers realisiert. Vereinzelt werden redundante Microcontroller erwähnt, jedoch ohne dass beschrieben wird, ob sich die Systeme gegenseitig überwachen und welche Steuerungskategorie erreicht wird [EXN99, JUR00, KNE00, HEY00].
- SPS:
  Mehrere Geräte sind mit einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) ausgestattet. Es findet sich allerdings kein Hinweis wie die sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung eingebunden sind und welche Steuerungskategorie erreicht wird [HEY00, HEY02, KNE06].
- Sichere SPS:
  Ein HLG zum Beschriften/Markieren verfügt gemäß Hersteller über eine sichere SPS [BAE06]. Alle sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung (Sensoren und Aktoren, z. B. Sicherheitsstrahlverschluss) werden in die Steuerung eingebunden. Die Steuerung erreicht eine Steuerungskategorie 4.
- Elektrische Leitungen:
  Aus den Veröffentlichungen ist zu entnehmen, dass für HLG sowohl konventionelle Verkabelungen wie auch Bussysteme eingesetzt werden [HAF00, HAF02, BER04, HAF06]. Hinsichtlich der Bussysteme wird vereinzelt erläutert, dass nicht sicherheitsgerichtete (CAN-BUS) [KNE06] oder sicherheitsgerichtete Bussysteme (safety-BUS; u. a. ASI-SafetyBus, SafetyBus-p) verwendet werden.

Erfassungssystem für Schadstoffe

- Einige HLG verfügen über integrierte Erfassungs- und Absaugsysteme für während der Bearbeitung entstehende Luftschadstoffe. Eine Überwachung der Absaugung (Volumenstrom, Druck) und Einbindung in die Steuerung ist nur in einem Fall beschrieben. Eine Beschreibung der Auslegung der Schaltung und die Einbindung in die Sicherheitssteuerung erfolgt nicht [BUE98, HAF00, JAS06, BAE06, BAR06].

Abschirmungen der Prozesszone

- Handarbeitsplätze (u. a. Dentalarbeitsplatz) verfügen über abgeschirmte Prozesszonen [ALB98, HAU98, ROT06]. Der Eingriff mit den Händen/Armen erfolgt über Stulpen. Die Überwachung der Abschirmung (Zustand: geschlossen) wird mittels Sicherheitspositionsschalter realisiert.
- Vereinzelte HLG zur 2D-Bearbeitung (Schweißen, Markieren) bilden bei Aufliegen auf dem Werkstück zusammen mit dem Werkstück eine vollständig geschlossene Prozesszone [EXN99, HAF00, BAE06]. Beschrieben werden verschiedene diversitäre Verfahren zur Überwachung der Auflage und der Abschirmung (mech. Sensoren, Drucksensoren, Umgebungslichtsensoren, s. o.). Die Ausführung der Sensoren und die Einbindung in die Sicherheitssteuerung (mit Angabe der Steuerungskategorie) erfolgen nur in einem Fall (HLG zum Markieren [BAE06]).

- Einige HLG verfügen über partielle Abschirmungen der Prozesszone, um insbesondere den Bediener vor reflektierter bzw. gestreuter Laserstrahlung im bestimmungsgemäßen Betrieb zu schützen. Die Abschirmungen bestehen u. a. aus Blechen, Bürsten, Gummimanschetten etc. [HAF00].
- Auch wird von Sicherheitsstrahlfängern auf der dem HLG abgewandten Werkstückseite berichtet, sofern diese zugänglich ist [JAS06].
- Insbesondere bei Restaurierungsarbeiten wird nur auf eine periphere Abschirmung (Vorhänge) zurückgegriffen [STR03, FRA05, KOS05].

<u>Sensoren optisch für Laserbereichüberwachung</u>
- Erläutert wird, dass einige freigeführte HLG, bzw. die Sicherheitssteuerung, über externe sichere Eingänge verfügen. An diese kann ein Interlock, z. B. ein Bewegungsmelder zur Überwachung des Laserbereiches, angeschlossen werden [WAG98, COO05].

Im Folgenden sind einige ausgewählte Passagen aus Veröffentlichungen zitiert, um einen Eindruck über die Detailtiefe der beschriebenen Sicherheitskonzepte/-einrichtungen zu vermitteln.

Zitate:
1) „… um optimale Sicherheit vor der unsichtbaren Laserstrahlung zu gewährleisten, verfügt der Handkopf auf Wunsch über eine integrierte Sicherheitsabschaltung, die ein unbeabsichtigtes Austreten der Laserstrahlung verhindert …“ [BUE98]
2) „… das umgesetzte Sicherheitskonzept besteht aus einer Anzahl unterschiedlicher Überwachungskomponenten für unterschiedliche, vorab zu definierende Zustände, wobei erst die Gesamtheit aller positiven Erkennungssignale eine Freigabe des Schweißprozesses zulässt …“ [BUT98]
3) „… alle Funktionen des Lasergerätes, wie Laserpuls, Shuttersteuerung, Netzteilansteuerung, Temperaturregelung, Fokusverstellung, Sicherheitskreis, Speicherung von Datensätzen und Diagnose- und Testroutinen werden von einem leistungsfähigen Mikroprozessor erledigt …“ [JUR00]
4) „… die Sicherheitsmaßnahmen wurden nach der Risikokategorie 3 ausgelegt. Folgende Maßnahmen gewährleisten einen umfassenden Schutz des Bedieners:
   - NOT-AUS-Schaltgerät Kategorie 4
   - überwachter Start
   - überwachte Schütze zur Laserabschaltung mit zwangsgeführten Kontakten
   - zweikanalige Beschaltung mit redundanter Überwachung, ob der Handbearbeitungskopf auf Metall aufsitzt
   - Faserbruchüberwachung
   - massives Gehäuse und Videobeobachtungssystem …“ [GUE04]

Patente

Die bisherigere Patentrecherche erfolgte auf Basis von Datenbanken (online), u. a. DEPATISnet, Esp@cenet und dem US-Patentamt ab 1975. Recherchiert wurden sowohl Offenlegungsschriften als auch erteilte Patente. Im Folgenden sind die wesentlichen Aussagen mit Bezug zur Lasersicherheit sowie zum Arbeitsschutz von HLG zusammengefasst.

Es existiert ein Reihe von Offenlegungsschriften und erteilten Patenten über handgeführte und -positionierte Lasergeräte zur Materialbearbeitung (HLG). Zum Teil sind die Inhalte der Patente redundant (zu einer Patentfamilie zugehörig), da sie auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene angemeldet wurden oder es sich um

technische Ergänzungen/Weiterentwicklungen handelt. In Abschnitt 10 (Literaturverzeichnis) ist eine tabellarische Aufstellung verschiedener Patentfamilien gegeben.

Festzustellen ist, dass konstruktive Sicherheitseinrichtungen von HLG überwiegend in den Unteransprüchen von Patenten zu HLG beschrieben werden (nur vereinzelt finden sich Angaben zu Sicherheitseinrichtungen im Hauptanspruch). Da die Ansprüche in Patenten derart formuliert werden, dass sie allgemeingültig (unbestimmt) sind, finden sich nur undetaillierte Beschreibungen von Einrichtungen zur Gewährleistung der Lasersicherheit. Tiefergehende beispielhafte Beschreibungen werden in den Dokumenten zumeist in den Ausführungsbeispielen der Geräte gegeben.

Auffallend ist, dass in mehreren Patentanmeldungen unterschiedlicher Anmelder und Erfinder technisch gleiche Sicherheitseinrichtungen, z. T. in Haupt- und Unteransprüchen, beschrieben werden. Inwieweit dieses zu Ansprüchen aus dem PatG (Patentgesetz) und dem EPÜ (Europäisches Patentübereinkommen) hinsichtlich „Neuheit“ und „Erfinderische Tätigkeit“ konform ist, kann und soll an dieser Stelle nicht kommentiert werden. Beispiele hierfür sind: Sensoren zur Messung des Drucks in einem abgeschirmten Prozessbereich (hier gleichzusetzen mit Laserbereich) aus DE 195 15 633 C1, DE 198 17 629 A1 und DE 102 55 747 A1. Oder die Detektion von Fremdlicht im abgeschirmten Prozessbereich aus DE 196 36 458 C1 und u. a. DE 100 59 246 A1.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass folgende sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen bei HLG als Ansprüche, Ausführungsbeispiele oder Stand der Technik beschrieben sind (vergleiche auch mit Abschnitt 10):

Abschirmungen der Prozesszone/des Laserbereiches

- Einige HLG (überwiegend zur 2D-Bearbeitung) bilden bei Aufliegen auf dem Werkstück zusammen mit dem Werkstoff eine vollständig geschlossene Prozesszone/Laserbereich. Dieses können z. B. bei Markierungsarbeiten größere Abschirmungen sein, die den Arbeitsbereich des Scanners umfassen; größere Abschirmungen finden sich auch bei Aufsatzgeräten zum Fügen, die über einen internen Traktor verfügen.
  Es gibt aber auch HLG, bei denen u. a. beim Schweißen nur ein sehr kleiner Bereich um die Prozesszone abgeschirmt wird. Diese eher punktuellen Abschirmungen bestehen u. a. aus Stahlgehäusen mit flexiblen Gummidichtungen zum Werkstück, Faltenbälgen oder Bürstenringen.
  Typische verwendete Sicherheitssensorsysteme sind bei diesen Geräten Drucksensor oder Fremd-/Umgebungslichtsensor innerhalb der Prozesszone. Vielfach werden Auflagesensoren, (mechanisches, elektromechanisches, elektrisches Wirkprinzip) eingesetzt. Auch werden schwenkbare Gehäuseteile, die sich erst bei Kontakt zum Werkstück öffnen und den Laserstrahl freigeben (über Schalter) beschrieben (DE 196 36 458 C1).
- Einige HLG verfügen über eine partiell geschlossene Abschirmung. Diese können u. a. als Minimalspalt zum Werkstück ausgelegt werden (überwiegend 2D-Anwendungen) oder nur aus partiellen Abschirmungen z. B. zur Bedienerseite hin gestaltet sein (überwiegend 3D-Anwendungen).
  Typische Sicherheitssensoren sind Drucksensoren bei Minimalspalt, oder Streulichtdetektoren (Laserstrahlung) an der Außenseite der Gehäuse von HLG. Als Auflage- oder Abstandssensoren werden berührende Verfahren (mechanisch über federbelasteten Stift, elektrisch über Nadel mit Stromfluss) oder berührungslose Verfahren wie induktive/kapazitive Sensoren oder optische Sensoren (Distanzsensor, Triangulation) eingesetzt.

Näherungsmelder/-sensoren

In einer Offenlegungsschrift (DE 195 19 150 A1) wird bei einem teilabgeschirmten HLG eine Sicherheitseinrichtung beschrieben, die auf einem Näherungsmelder/-sensor basiert. Überwacht wird hiermit das Umfeld des Bearbeitungsbereiches. Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass Laserstrahlung in bestimmten Bereichen zum HLG gefährlich für Personen werden kann, werden die Bereiche mit einem Näherungsmelder/-sensor überwacht. Der Sensor ist in den Steuerungskreis für die Laserstrahlisolierung eingebunden und gibt ein Signal zur Laserstrahlisolierung, wenn Personen den Bereich betreten. Bei dem Sensor dürfte es sich gemäß den Ausführungsbeschreibungen u. a. um einen IR-Bewegungsmelder oder einen Laserscanner handeln.

Sensoren

Beschrieben werden folgende Sensoren:

1) Sensoren für die Positions-/Auflage-/Abstandskontrolle und „Dichtheit“ des Laserbereiches

- Drucksensor im Prozessraum/Laserbereich
- Fremd-/Umgebungslichtdetektor im Prozessraum/Laserbereich
- Berührende Auflage-/Kontaktsensoren
    - mechanisch: federbelasteter Stift in Verbindung mit Schalter
    - elektromechanisch: federbelasteter Stift in Verbindung mit induktivem/kapazitivem Sensor
    - mechanisch/elektrisch: Abstandsnadel mit kodiertem/moduliertem Stromfluss
- Berührungslose Abstandssensoren
    - induktiv
    - kapazitiv
    - optisch als Distanzsensor oder Triangulationssensor
    - thermisch als Wärmestrahlungsdetektor, oder online Spektrograph
- Streulichtsensoren (Laserstrahlung) außerhalb der Abschirmung/Prozesszone

2) Sensoren für die Strahlführungsüberwachung

- Streulichtsensor im HLG-Gehäuse zur Kontrolle der Strahlführung/Justage
- Temperatursensor im HLG-Gehäuse zur Kontrolle der Strahlführung/Justage
- Monitordiode im HLG zum Vergleich der vom Lasergerät emittierten und der am HLG ankommenden Laserstrahlleistung.

Bedienelemente

Die Ausführungen zu Bedienelementen sind sehr undetailliert. Benannt werden Einfingertaster und Zweifinger-/Zweihandschaltungen. Sie dienen zur Strahlfreigabe bzw. Strahlisolierung, z. T. in Verbindung mit anderen Interlocks. Inwieweit die Elemente (Schalter/Taster) in elektronische Steuerungen logisch eingebunden sind, wird nicht näher erläutert.

Steuerungen

Die Ansprüche und Ausführungsbeschreibungen bezüglich Steuerungen von HLG beinhalten im Wesentlichen die Angaben zu Microcontrollern, NOT-AUS-Keisen, Sicherheitsbausteinen (Relais) und/oder logischen Verknüpfungen. Detaillierte Angaben hinsichtlich der Sicherheit (Steuerungskategorie) der elektronischen Schaltungen werden nicht gegeben.

Absaugeinrichtungen/Abluftreinigung

In den Haupt- und Unteransprüchen sowie in Ausführungsbeschreibungen werden Elemente zur Erfassung, Absaugung und z. T. zur Abluftreinigung/Filtration der lasergenerierten Luftschadstoffe (LGACs) beschrieben. Systeme zur Sicherstellung der Funktion und Einbindung in eine Sicherheitssteuerung werden nicht beschrieben.

Besondere Einrichtungen

1) IR-Detektorsystem für menschliches Gewebe
In einem US-Patent (US 2000/6160835 A) wird in einem Unteranspruch ein Sensorsystem erwähnt, das im IR-Bereich Strahlung emittiert und von menschlichem Gewebe remittierte Strahlung detektiert. Es ist hierdurch in der Lage, menschliches Gewebe vor der Strahlaustrittsöffnung zu erkennen und ein Signal zur Laserstrahlisolierung zu geben.
2) HLG mit vollständig optisch entkoppelter Prozessfeldbeobachtung
In einem japanischen Patent (JP 09300088 AA) wird ein HLG mit einer offenen Prozesszone beschrieben. Der Bediener trägt vor der Stirn und den Augen einen Gesichtsschirm, in dem die mit einer bildaufnehmenden Einrichtung gewonnenen Signale (Bildinformationen) über einen Monitor wiedergegeben werden.

2.2 Stand der Normung im Bereich konstruktiver Sicherheitseinrichtungen für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung

Im Rahmen entwicklungsbegleitender Normung wurde bereits zeitnah, parallel zur technischen Weiterentwicklung handgeführter und -positionierter Lasergeräte zur Materialbearbeitung, eine Fachnorm (Typ C-Norm), die DIN EN ISO 11553-2: „Sicherheit von Maschinen, Laserbearbeitungsmaschinen – Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte“ erstellt [PUE02, PUE05].

Initiiert wurde die Norm im Jahr 2000 als „New Work Item Proposal“ (NWIP) vom deutschen Arbeitskreis O18 AK3 „Laser: Systeme und Schnittstellen“. Auf internationaler Ebene ist derzeit die Arbeitsgruppe WG 3 „Safety“ des Subcommittees SC 9 „Electrooptical Systems“ der ISO/TC 172 „Optics and optical instruments“ für die Norm zuständig. Dabei bildet die ISO/TC 172/SC 9/WG 3 mit der IEC/TC 76/WG 10 eine gemeinsame Arbeitsgruppe (Joint Working Group).

Die unter der europäischen Maschinenrichtlinie formulierte Fachnorm DIN EN ISO 11553-2 nimmt die Anforderungen von Grund- und Gruppennormen wie der DIN EN ISO 12100 sowie der DIN EN ISO 11553-1: Laserbearbeitungsmaschinen – allgemeine Sicherheitsanforderungen“ auf und bildet sie für die Gattung handgeführter Laserbearbeitungsgeräte zur Materialbearbeitung im Teil 2 der DIN EN ISO 11553 ab.

Die Frage nach dem Sinn für eine spezielle Regelung für handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung kann beantwortet werden, wenn man die besonderen mit dem Umgang von HLG verbundenen Gefährdungen betrachtet, die sich zum Teil deutlich von anderen Lasermaschinen abheben (u. a. Sicherheit vor Laserstrahlung, Arbeit in engen Räumen, hochgelegene Arbeitsplätze, bei Außenarbeiten Gefährdung von unbeteiligten Personen). Die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Konstruktion der HLG sowie die Benutzer-Informationen müssen die technischen Besonderheiten (Schnittstellen, Strahlführung, Steuerungstechnik, trennende Sicherheitseinrichtungen) der Gesamtmaschine (Lasergerät mit handgeführter Handhabungseinheit) berücksichtigen.

Die DIN EN ISO 11553-2:2009-03 beschreibt in den Unterabschnitten zu 5.3 die Ausführung korrigierender Maßnahmen. Hierzu gehören die Durchführung einer Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung sowie die Einbeziehung von Sicherheitsmaßnahmen, insbesondere der Schutz vor Gefährdungen durch Laserstrahlung. In Abschnitt 5.4 werden Anforderungen an die Konstruktion der HLG gestellt.

Aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes sind die in den Abschnitten formulierten Anforderungen oftmals abstrakt gehalten. Ziel sollte es sein, sicherheitsrelevante Anforderungen wie u. a. an den maximal zulässigen Nachlauf (für die Laserstrahlisolierung) oder an die Verwendung von Zustimmschaltern zu formulieren, ohne allerdings die gestalterische Freiheit der HLG-Konstrukteure zu stark einzuschränken.

Wünschenswert wären in einem informativen Anhang praxisrelevante Informationen zu möglichen konstruktiven Sicherheitskonzepten und zur qualifizierten Einbindung von sicherheitsbezogenen Teilen von Steuerungen (Sensoren, Steuerungen, Aktuatoren). Die DIN EN 60825-4:2009 „Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 4: Laserschutzwände“ mit den informativen Anhängen F und G gibt hier ein gutes Beispiel.

2.3 Schlussfolgerungen und Formulierung des Entwicklungsbedarfs

Insgesamt wird eine Vielzahl technischer Sicherheitssysteme für die Anwendung bei HLG beschrieben, so dass hinsichtlich weiterer Patentanmeldungen der derzeitige Stand der Technik „neuheitsschädlich“ sein dürfte. Da eine Reihe der Patente nicht erteilt, erloschen oder abgelaufen ist, besteht aber die Möglichkeit, entsprechende Einrichtungen/Systeme bei derzeitig zu entwickelnden HLG einzusetzen.

Generell sind die in den Veröffentlichungen und Patenten beschriebenen Sicherheitseinrichtungen durch ihre Wirkungsprinzipien mehr oder weniger geeignet, in Verbindung mit Steuerungen eine sichere Isolierung/Abschaltung der Laserstrahlung zu gewährleisten.

Als Defizit ist zu bewerten, dass in den zur Verfügung stehenden Unterlagen kaum Informationen über die Funktionalität sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen und die funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer Steuerungssysteme – SRECS – oder elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme (Steuerungskategorie, PL, SILCL, SIL gem. DIN EN 13849-1, DIN IEC 62061, DIN EN 61508) gegeben werden.

In den meisten Fällen kann daher <u>keine</u> detaillierte Bewertung der Systeme in Bezug auf den erreichbaren Sicherheitsgrad der HLG vorgenommen werden.

Es besteht daher die Aufgabe, zum einen grundlegende Anforderungen an die Sicherheitseinrichtungen von HLG zu definieren; dieses kann anhand von Gefährdungsanalysen und Risikobeurteilungen exemplarisch für ausgewählte HLG und Applikationen erfolgen.

Zum anderen müssen Informationen über die technische Umsetzung von konstruktiven Sicherheitseinrichtungen, insbesondere von sicherheitsbezogenen Teilen von Steuerungen gegeben werden. Diesbezüglich sind am Markt verfügbare Sensoren, Steuerungen und Aktuatoren auf Ihren Einsatz und ihre Eignung für HLG zu überprüfen.

3 Theoretische Betrachtung der Anforderungen an konstruktive Sicherheitseinrichtungen von HLG

Dieser Abschnitt greift bestehende Anforderungen an die Sicherheit von Maschinen und Geräten, wie sie in europäischen Richtlinien, nationalen Gesetzen und Verordnungen sowie technischen Regeln formuliert sind, auf und beschreibt ihre Auswirkungen auf die Konstruktion von HLG. Erläutert wird der aus Gefährdungsanalyse, Risikobeurteilung und Implementierung von Schutzmaßnahmen bestehende Prozess der Risikominderung; anhand von am Markt verfügbaren HLG werden typische getroffene Maßnahmen zur Risikominderung erläutert und Optimierungsbedarf aufgezeigt.

Am Beispiel ausgewählter HLG-Bauformen und angesetzter Szenarien für vorhersehbare Fehlerbedingungen werden konkrete Anforderungen an die Konstruktion und insbesondere an die sicherheitsbezogenen Teile von Steuerungen der HLG abgeleitet.

Dieses beinhaltet die Betrachtung der technischen Eigenschaften von sicherheitsbezogenen Bauteilen (Performance Level) einschließlich der maximal zulässigen Zeitregime für eine Isolierung der Laserstrahlung (Nachlauf).

3.1 Strategie der Risikominderung

Gemäß normativer Regularien (Maschinenrichtlinie, DIN EN ISO 12100-1) muss der Konstrukteur/Hersteller die Sicherheit für Maschinen durch folgendes Vorgehen sicherstellen:

- Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung
- Einbeziehung von Sicherheitsmaßnahmen
- Bescheinigung der Überprüfung der Sicherheitsmaßnahmen
- Bereitstellung geeigneter Benutzerinformationen.

Dieses bedeutet, dass sich der Risikobeurteilung üblicherweise eine Strategie zur Risikominderung gem. DIN EN ISO 12100-1 anschließt. Es handelt sich hierbei um einen iterativen Prozess mit dem Ziel einer hinreichenden Risikominderung durch das Umsetzen von Schutzmaßnahmen.

Alle Schutzmaßnahmen, die zum Erreichen dieses Ziels angewendet werden, sind gem. DIN EN ISO 12100-1 in der folgenden, als „3-Stufen-Methode“ bezeichneten, Reihenfolge zu ergreifen (Abb. 3.1):

- Inhärent sichere Konstruktion
- Technische Schutzmaßnahmen und eventuell ergänzende Schutzmaßnahmen
- Benutzerinformation hinsichtlich des Restrisikos

Schutzmaßnahmen, die vom Konstrukteur durchzuführen sind	
Schritt 1:	Inhärent sichere Konstruktion
Schritt 2:	Technische Schutzmaßnahmen und ergänzende Schutzmaßnahmen
Schritt 3:	Benutzerinformation – an der Maschine – im Benutzerhandbuch

Schutzmaßnahmen, die vom Benutzer durchzuführen sind
- Organisation
- Bereitstellung und Anwendung zusätzlicher Schutzeinrichtungen
- Anwendung persönlicher Schutzausrüstungen

Abb. 3.1 Schutzmaßnahmen (nach DIN EN ISO 12100-1)

Dieses grundsätzliche Vorgehen zur Risikominderung findet sich auch in der produkt-spezifischen Norm (Typ C-Norm) DIN EN ISO 11553-2 „Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte“ wieder:

- Auf Grundlage der Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung müssen entsprechende Sicherheitsmaßnahmen durch Konstruktion und Herstellung in das handgeführte Laserbearbeitungsgerät integriert sein.
- Des Weiteren sind vorrangig technische Maßnahmen zu ergreifen, um das Risiko durch Laserstrahlung auf ein akzeptables Maß zu reduzieren.
- Erst nachrangig sind organisatorische Maßnahmen oder persönliche Schutzausrüstung (wie Laserschutzbrille oder Kleidung, die einen Mindestschutz gegen Laserstrahlung bietet) zu treffen und
- der Benutzer ist über die verbleibenden Risiken (Restrisiken) zu informieren.

Dem Benutzer obliegt im Rahmen der Risikominderung gemäß DIN EN ISO 12100-1 die Organisation der Tätigkeiten. Dieses beinhaltet u. a.:

- die Auswahl sicherer Arbeitsverfahren,
- die Betriebserlaubnis zur Ausführung von Arbeiten,
- die Bereitstellung von zusätzlichen Schutzeinrichtungen,
- die Bereitstellung und Anwendung persönlicher Schutzausrüstung sowie
- die Auswahl und Unterweisung der Beschäftigten,
- die Überwachung der Einhaltung aller Maßnahmen.

HLG und Strategie der Risikominderung

Die Studie der Literaturstellen, Patente und die Kenntnis über HLG-Prototypen lassen den Schluss zu, dass der Schwerpunkt der Aktivitäten der Konstrukteure/Hersteller von HLG bislang vorzugsweise auf der Sicherstellung/Kontrolle des Lasermaterialbearbeitungsprozesses liegt (siehe auch Abschnitt 2.1: „Status-Quo HLG"). Oftmals ist eine Strategie zur Risikominderung nur in Ansätzen zu erkennen. Legt man die in der DIN EN ISO 121001 definierte „3-Stufen-Methode" zu Grunde, so lässt sich feststellen, dass vielfach andere Prioritäten gesetzt werden. Nur wenige HLG weisen eine inhärent sichere Konstruktion auf (u. a. [BAE06]) oder kommen diesem Anspruch nah. Überwiegend werden die HLG mit nicht abgeschirmter Prozesszone betrieben, so dass sie vom Hersteller gemäß DIN EN 60825-1 als Laser der Klasse 4 klassifiziert werden. Dieses bedeutet, dass der Hersteller den Betreiber über die „Restrisiken" durch Laserstrahlung informiert und gleichsam ihm die Verantwortung aufträgt, dass zur Risikominderung technische Maßnahmen, wie z. B. externe Abschirmungen des Laserbereiches (Vorhänge, Wände) und ergänzende Schutzmaßnahmen, wie insbesondere persönliche Schutzausrüstung (Laserschutzbrillen) angewendet werden müssen.

Ziel muss es daher sein, für HLG verschiedener Anwendungen und Bautypen technische/konstruktive Lösungsansätze zur Risikominderung aufzuzeigen. Durch Erweiterung des Kenntnisstandes von HLG-Konstrukteuren in Bezug auf technische und ökonomische Daten für konstruktive Sicherheitsmaßnahmen besteht die Aussicht, dass zukünftige HLG dem Prinzip einer inhärent sicheren Konstruktion gerechter werden. Hierzu will dieses Projekt einen Beitrag leisten.

3.1.1 Verfahren der Risikobeurteilung

Für die vom Konstrukteur/Hersteller durchzuführende Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung (nach DIN EN ISO 12100-1) sind in der Norm DIN EN ISO 14121-1 Leitsätze für ein in sich geschlossenes systematisches Verfahren beschrieben. Im Folgenden sind einige wichtige Punkte des Verfahrens zur Veranschaulichung herausgegriffen.

Die Risikobeurteilung umfasst im Wesentlichen zwei Teilbereiche mit z. T. mehreren Unterpunkten.

a) Risikoanalyse
   1) Festlegung der Grenzen der Maschine
   2) Identifizierung der Gefährdungen
   3) Risikoeinschätzung

b) Risikobewertung

In Abb. 3.2 ist der iterative Prozess zur Risikominderung als Flussdiagramm dargestellt.

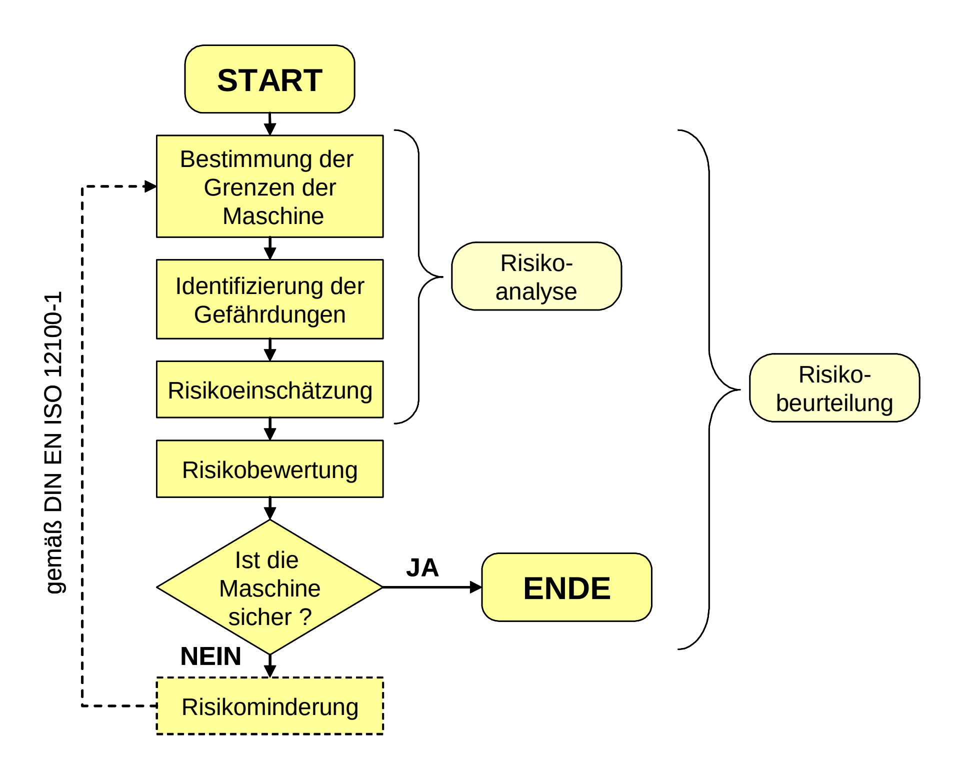


Abb. 3.2 Iterativer Prozess zur hinreichenden Risikominderung

Das Verfahren der Risikobeurteilung als Teil der Risikominderung beginnt mit der „Festlegung der Grenzen der Maschine". Hierunter versteht man die Definition

- der Verwendungsgrenzen (bestimmungsgemäßer Betrieb und vorhersehbare Fehlerfälle),
- der verschiedenen Betriebsarten der Maschine,
- der räumlichen Grenzen (u. a. technische Schnittstellen, Schnittstelle Mensch/Maschine)
- der zeitlichen Grenzen (u. a. Life cycle, Wartungsintervalle) sowie
- weiterer Grenzen (umgebungsbezogene Einsatzgrenzen: Temperatur, Feuchte etc.)

Anschließend erfolgt die Identifizierung der Gefährdungen, die innerhalb der Grenzen der Maschine und an den Schnittstellen auftreten können.

Für jede mögliche Gefährdungssituation ist eine Risikoeinschätzung durchzuführen, in dem so genannte Risikoelemente (Schadensausmaß, Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens, Möglichkeiten zur Vermeidung eines Schadens) bestimmt werden.

Im Anschluss an die Risikoeinschätzung wird eine Risikobewertung durchgeführt. Anhand des Ergebnisses der Risikobewertung wird entschieden, ob eine Risikominderung erforderlich ist. Falls dieses notwendig ist, sind geeignete Schutzmaßnahmen auszuwählen und anzuwenden. Bezüglich der Strategie der Risikominderung ist der oben beschriebenen 3-Stufen-Methode gem. DIN EN ISO 12100-1 zu folgen.

HLG und Risikobeurteilung

Aufgrund der mannigfaltigen Applikationsmöglichkeiten von HLG und der daraus resultierenden Bauartenvielfalt kommt der Risikobeurteilung eine hohe Bedeutung zu. In der folgenden Abb. 3.3 sind exemplarisch verschiedene Bauarten, ihre Klassifizierung gemäß DIN EN 60825-1 und daraus resultierende Anforderungen an Schutzmaßnahmen dargestellt.

Aufsatzgerät
- mit lokaler Abschirmung
- mit Aufsatzkontrolle



Im bestimmungsgemäßen Betrieb: Außerhalb der Abschirmung kein Gefahrenbereich.

Referenz: LZH

„so sicher wie Laser Klasse 1“
sichere Maschine gem. DIN EN ISO 11553-2

- **Hohe Anforderungen an Steuerungstechnik/Sicherheitstechnik**
- **Keine PSA erforderlich**

Frei führbares Gerät (i.d.R. 3D)
- ohne lokale Abschirmung
- optional mit Aufsatz-/Abstandskontrolle



Laserbereich einrichten. Bediener arbeitet im Gefahrenbereich.

Referenz: MobilLaserTec



„Laser Klasse 4“



- **Niedrigere Anforderungen an Steuerungstechnik/Sicherheitstechnik**
- **PSA unbedingt erforderlich**

Abb. 3.3 Bauarten von HLG, ihre Klassifizierung gemäß DIN EN 60825-1 und daraus resultierende Anforderungen an Schutzmaßnahmen

Handlungsschritte

1) Entscheidend ist die Festlegung der Einsatzgrenzen des HLG.

In einem ersten Schritt sind die Grenzen der Verwendung zu bestimmen.

- Zu berücksichtigen ist die bestimmungsgemäße Verwendung.
- Insbesondere bei HLG ist auch die Einbeziehung vorhersehbarer Fehlerbedingungen von ausgesprochener Wichtigkeit. Hierzu gehören u. a.:
  - Reflexion von Laserstrahlung an spiegelnden Bauteilkanten,
  - Durchtritt von Laserstrahlung durch das Werkstück oder Werkstückspalten,
  - Abrutschen des HLG vom Werkstück,
  - Abrutschen, Sturz des Bedieners,
  - Nicht angepasste Schnittstellen (z. B. Strahlführung-Faserstecker-, max. Leistung, Energieversorgung),
  - Fehlerhafte Bedienung (z. B. falsche Leistungseinstellung, falsches Prozessgas).

Die Festlegung des Einsatzbereiches beinhaltet eine Vielzahl von Parametern, u. a.

- Betriebsarten des HLG einschließlich von Eingriffsmöglichkeiten des Benutzers
  - Normalbetrieb,
  - Eingriffe (mögliche Eingriffe), die bei Fehlerbedingungen durch den Benutzer erfolgen
- Einsatzbereich des HLG
  - in Gebäuden oder
  - in Außenbereichen

- Nutzung des HLG von Personen
  - Rechtshänder, Linkshänder,
  - physische Fähigkeiten von Frauen/Männern, oder Personen mit körperlichen Beeinträchtigungen,
  - Ausbildungsstand der Bediener
- Personen im Umfeld des HLG
  - Personen im Gebäude, im Außenbereich (Öffentlichkeit).

Im Rahmen der räumlichen Grenzen sind neben der Festlegung des Bewegungsraums des HLG die Schnittstellen zu definieren. Entscheidend ist die Festlegung der technischen Schnittstellen vom HLG zum Lasergerät und zu weiteren Energieversorgungs- (u. a. Strahlführung, Lasergerät) und Entsorgungseinrichtungen (u. a. Abluftreinigungssystem). Ebenso wichtig ist die Schnittstelle HLG/Mensch (u. a. Gestaltung der Taster/Griffe, Ablesbarkeit von Instrumenten, Erkennbarkeit von Warnleuchten mit Laserschutzbrille).

Die Festlegung der zeitlichen Grenzen beinhaltet die Betrachtung des HLG über den gesamten Lebenszyklus, u. a.

- Herstellung,
- Transport,
- Zusammenbau und Installation, u. a. mit weiteren Komponenten (Strahlführung, Lasergerät),
- Inbetriebnahme (u. a. Festlegung des Bearbeitungsortes, Strahljustage, Prüfungen),
- Verwendung (u. a. Festlegung der max. Einsatzdauer, Einsatzpositionen),
- Außerbetriebnahme, Demontage.

Unter dem Punkt „Festlegung weiterer Grenzen“ lässt sich erneut eine Vielzahl von Parametern zusammenfassen, die bei Tätigkeiten mit HLG hohe Bedeutung haben, wie die Angabe von maximalen Einsatzbedingungen

- (u. a. Höchsttemperatur, Feuchte, weitere Witterungsbedingungen); insbesondere für HLG, die im Außenbereich eingesetzt werden, ist die Beurteilung relevant
- Werkstoffe oder -kombinationen, die mit dem HLG bearbeitet werden.

2) Für alle oben aufgelisteten Parameter/Zustände sind mögliche Gefährdungen zu identifizierten und die damit verbundenen Risiken zu bewerten.

3.2 Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung für ausgewählte Beispiele von handgeführten Lasern zur Materialbearbeitung

Mit Bezug zu handgeführten Lasern zur Materialbearbeitung werden im Folgenden Gefährdungen durch Laserstrahlung ermittelt und bewertet.

Die Beurteilung des Risikos und die Ableitung von Anforderungen an Sicherheitsmaßnahmen beinhalten folgende Aspekte:

- Vorhersehbare Maximalbestrahlungen für vorhersehbare Fehlerbedingungen an Körperteilen,
- Maximal zulässige Abschaltzeiten (Nachlaufzeiten) für die Isolation der Laserstrahlung,
- Bestimmung des erforderlichen Performance Levels (PL_r) für einzelne sicherheitsbezogene Teile der Steuerung gemäß DIN EN ISO 13849-1.

In diesem Abschnitt werden verschiedene Ansätze zur Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung verfolgt.

3.2.1 Vorhersehbare Maximalbestrahlungen in vorhersehbaren Fehlerbedingungen an Körperteilen

Die wesentlichen Gefährdungen und Risiken resultieren insbesondere aus vorhersehbaren Fehlerbedingungen. Entscheidend für die Gefährdungsanalyse und Risikobewertung ist die Abschätzung der vorhersehbaren maximalen Bestrahlung (*VMB*) an dem exponierten Körperteil.

Nachstehend wird von folgenden Setzungen/Annahmen ausgegangen (betrachtet werden worst-case Szenarien):

- das Körperteil wird in einer Distanz *D* von der Bearbeitungsebene durch den direkten Strahl exponiert oder
- das Körperteil wird in einer Distanz *D* von der Bearbeitungsebene durch einen Laserstrahl, der als Punktquelle von einer in der Bearbeitungsebene befindlichen spiegelnden Werkstückoberfläche gerichtet reflektiert wird, exponiert.

Zur Berechnung der Bestrahlungsstärke an einem unbeabsichtigt exponierten Körperteil in einem Abstand *D* zur Werkstückebene/Fokusebene durch direkte Laserstrahlung wird das in Abb. 3.4 dargestellte Fallbeispiel zu Grunde gelegt.

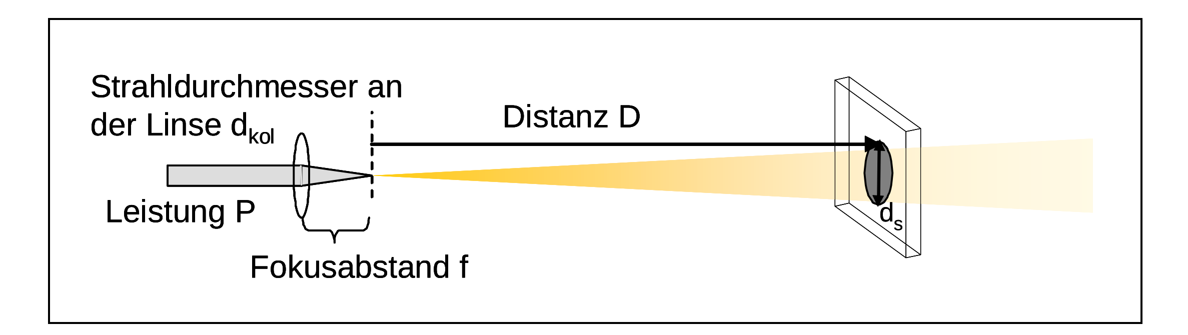


Abb. 3.4 Strahlverlauf nach einer fokussierenden Optik [HEN04]

Die Bestrahlungsstärke E an einem unbeabsichtigt exponierten Körperteil in einem Abstand D (Fernfeld) von der Fokussierebene kann bei gegebenen Parametern mit Hilfe folgender Gleichungen näherungsweise berechnet werden.

$$E = \frac{P \cdot 4 \cdot f^2}{\pi \cdot d_{kol}{}^2 \cdot D^2} \tag{3.1}$$

wobei

$$d_s = d_{kol}\left(\frac{D}{f}\right) + (\delta \cdot a) \tag{3.2}$$

mit:
δ : Divergenz
E : Bestrahlungsstärke
P: mittlere Leistung
D: Distanz
d_{kol} : Durchmesser kollimierter Strahl
d_s: Durchmesser des Bestrahlungsflecks am Schutzsystem
f : Fokusabstand

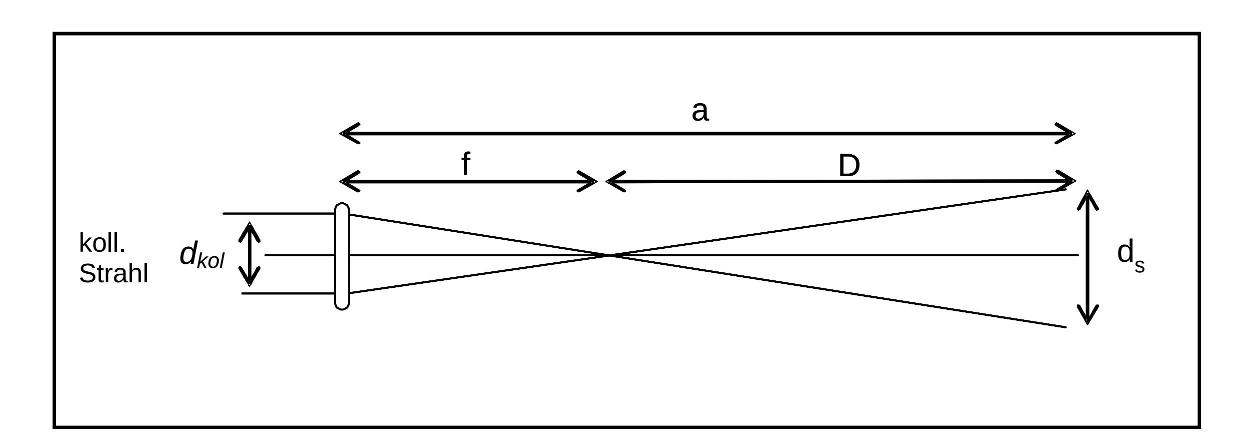


Abb. 3.5 Strahlverlauf nach einer fokussierenden Optik (schematisch) [SUT02]

In erster Näherung kann im Fernfeld der Divergenz-Term vernachlässigt werden, da sich hierdurch größere Bestrahlungsfleckdurchmesser bzw. kleinere vorhersehbare maximale Bestrahlungsstärken ergeben. Hinsichtlich der Beurteilung der Sicherheit bewegt man sich somit „auf der sicheren Seite“.

Wird die Laserstrahlung von einer Bauteilkante reflektiert, so muss zwischen diffuser und gerichtet reflektierter Strahlung unterschieden werden. Während für diffus reflektierte Strahlung die Bestrahlungsstärke gemäß der „Abstand-Quadrat-Beziehung“ bei Betrachtung des gesamten Raumwinkels abnimmt, folgt eine gerichtet reflektierte Strahlung (Punktquelle) im Wesentlichen den Regeln für den direkten Strahl in einem eng begrenztem Raumwinkel. Hierdurch ergeben sich bei gleichem Abstand deutlich höhere Bestrahlungsstärken.

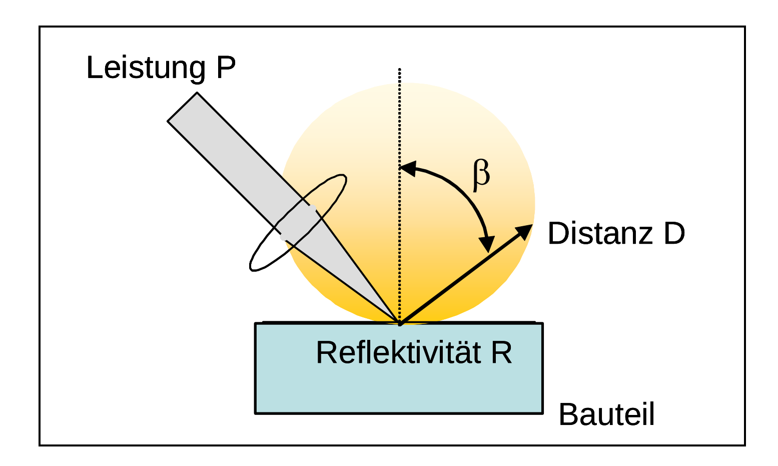


Abb. 3.6 Diffus und gerichtet reflektierte Laserstrahlung [HEN04]

Bestrahlungsstärke für diffus reflektierte Laserstrahlung im Abstand *D*

$$E = \frac{R \cdot P \cdot \cos\beta}{D^2 \cdot \pi} \quad \textbf{(3.3)}$$

mit:
E: Bestrahlungsstärke
R: Reflektivität der Bauteiloberfläche
P: Mittlere Leistung
D: Distanz zwischen Bauteil und Körperteil
β: Reflexionswinkel

In der folgenden Darstellung (Abb. 3.7) sind typische Abstände von der Bearbeitungsposition zu Körperteilen beim Umgang mit HLG angegeben.

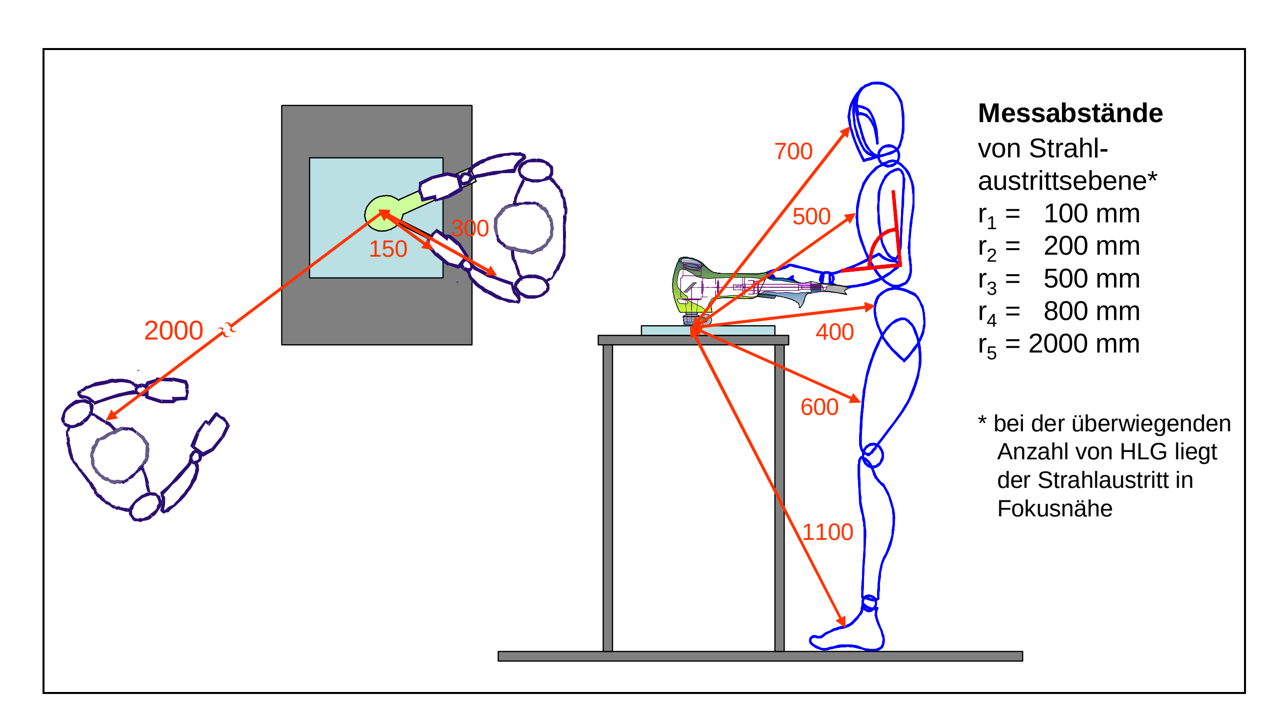


Abb. 3.7 Typische Abstände von der Bearbeitungsposition zu Körperteilen beim Umgang mit HLG

Für die weiteren Betrachtungen wird von einer Distanz vom Prozessort bis zum nächsten Körperteil (Hand) von 150 mm ausgegangen (siehe linker Bildabschnitt).

Im Folgenden ist exemplarisch eine tabellarische Übersicht über HLG und deren technische Daten angegeben, wie sie am Markt eingesetzt werden.

Tab. 3.1 Technische Daten verwendeter HLG und Strahlquellen*

Strahlquelle	Yb:YAG, Scheibenlaser
Wellenlänge λ	1030 nm
Mittlere Leistung P_m	max. 3000 W
Brennweite f (HLG)	100, 150, 200 mm
Kollimierter Rohstrahl d_{kol} (HLG)	20 mm

Strahlquelle	Nd:YAG, lampengepumpt
Wellenlänge λ	1064 nm
Mittlere Leistung P_m	max. 4000 W
Brennweite f (HLG)	100, 150, 200 mm
Kollimierter Rohstrahl d_{kol} (HLG)	20 mm

Strahlquelle	Faserlaser
Wellenlänge λ	1070-1080 nm
Mittlere Leistung P_m	max. 3000 W
Brennweite f (HLG)	100, 150, 200 mm
Kollimierter Rohstrahl d_{kol} (HLG)	20 mm

Strahlquelle	Diodenlaser
Wellenlänge λ	808, 915, 940, 980 nm
Mittlere Leistung P_m	bis 400 W
Brennweite f (HLG)	30-40 mm
Kollimierter Rohstrahl d_{kol} (HLG)	18 mm

* Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Mit Hilfe der technischen Daten der HLG und Laserstrahlquellen in Verbindung mit typischen Abständen zu Körperteilen sind exemplarisch vorhersehbare maximale Bestrahlungen (*VMB*) für Dauerstrichbetrieb kalkuliert worden (vgl. Abb. 3.9).

3.2.2 Zulässige maximale Abschaltzeiten (Nachlauf) für die Isolation der Laserstrahlung

Zur Ermittlung erforderlicher Abschaltzeiten bzw. der maximal zulässigen Nachlaufzeiten werden zwei unterschiedliche Szenarien beurteilt.

Bei beiden Szenarien führen die äußeren oberen Extremitäten (hier Unterarm und Hand) Bewegungen aus, die zu einer Exposition durch Laserstrahlung führen. Für die Bewegungen werden vornehmlich Greifgeschwindigkeiten für freie Greifbewegungen angesetzt, die in der DIN EN 999:2008 definiert sind (Tab. 3.2).

Tab. 3.2 Annäherungsgeschwindigkeiten des Körpers oder von Körperteilen nach DIN EN 999:2008

Art der Bewegung	Gliedmaßenbereich	K [mm/s]
Greif- und Schreitgeschwindigkeit (für S > 500 mm)	obere und untere Gliedmaßen	1600
Greifgeschwindigkeit für Hand- und Fingerschutz (für S ≤ 500 mm)	obere Gliedmaßen	2000

* bei sich ergebenden Sicherheitsabständen: S

Weitere Daten bezüglich der Grenzen feinmotorischer Leistungsfähigkeit finden sich in der Literatur in den Bereichen Ergonomie, Anatomie und Motologie (Bewegungswissenschaften).

In [STI59, HER41] werden Geschwindigkeiten für Loslassbewegungen und Zielgreifen der Hand bei heterotropen Bewegungen für die betrachteten Greifdistanzen (bis 200 mm) von ca. 1000 mm/s angegeben. Daher wird zusätzlich mit diesem Wert als untere Grenze gearbeitet.

Angesetzt für die Bestimmung der maximal zulässigen Nachlaufzeit werden die gemäß Abschnitt 3.2.1 für verschiedene Laser ermittelten Werte für die vorhersehbare Maximalbestrahlung (*VMB*), wobei wiederum von einem Abstand vom Prozessort zur Hand von 150 mm ausgegangen wird (siehe auch Abb. 3.7).

<u>Szenario 1)</u>

Szenario 1 basiert auf der Verwendung eines HLG mit offener oder teilgeschirmter Prozesszone. Die Hand kann in einen Abstand von 150 mm zur Prozesszone gebracht werden, wo sie in Fehlerfällen durch die direkte oder gerichtet reflektierte Laserstrahlung bestrahlt werden kann. Das HLG verfügt über mindestens einen (oder zwei orthogonal zueinander stehende) Zustimmschalter, die außen am Gehäuse bzw. der Abschirmung montiert sind (siehe auch Abb. 3.8).

Fallunterscheidung:

a) Das HLG verfügt über zwei Zustimmschalter. Der Bediener lässt einen Zustimmschalter los und bewegt die Hand in einen Abstand von 150 mm zur Prozesszone, wo sie vom Laserstrahl bestrahlt werden kann.
b) Das HLG verfügt über einen Zustimmschalter. Die zweite Hand befindet sich am Rand der Abschirmung und wird von dort direkt in die Prozesszone (Bearbeitungsfleck) bewegt. Das Abschaltsignal wird in diesem Fall durch einen Sensor am Rand der Abschirmung generiert.

In beiden Fällen bestimmen bei gegebener Greifgeschwindigkeit K der beim Auslösen des Abschaltsignals bestehende Abstand der Hand zur Prozesszone und die maximal zulässige Expositionsdauer (auf Basis der Werte MZB_{Haut}) die maximal zulässige Nachlaufzeit.

In der folgenden Abb. 3.8 ist beispielhaft ein HLG mit Abschirmung und Handgriffen (Zustimmtastern) schematisch dargestellt.

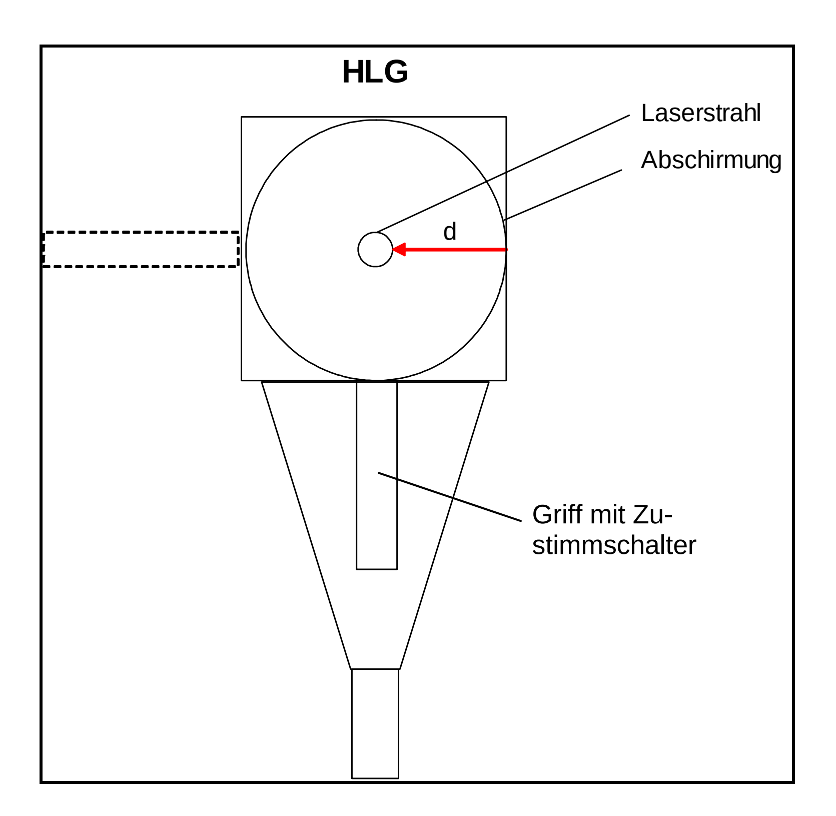


Abb. 3.8 HLG mit Abschirmung und Zustimmschalter(n)

Die maximal zulässige Nachlaufzeit berechnet sich aus folgenden zwei Termen:

$$t_{zN} \leq t_1 + t_2 \qquad \textbf{(3.4)}$$

1) Term 1

Berechnung der Zeit vom Erreichen des Abschirmungsrandes bis zum Erreichen des Laserstrahls bei gegebener Greifgeschwindigkeit.

$$t_1 = \frac{d}{K} \qquad \textbf{(3.5)}$$

2) Term 2

Berechnung der maximal zulässigen Expositionsdauern für die Haut bei
VMB = MZB_{Haut}

Wellenlängenbereich [nm]:	700 bis 1400
Expositionsdauer [s]:	10^{-7} bis 10
MZB_{Haut} nach DIN EN 60825-1:2008 [Jm^{-2}]	$1{,}1 \cdot 10^4 \cdot C_4 \cdot t^{0,25}$

$$VMB = MZB_{Haut} = 1{,}1 \cdot 10^4 \cdot C_4 \cdot t_2^{\,0,25} Jm^{-2} \qquad \textbf{(3.6)}$$

bei gleichförmiger Bestrahlung in Wm^{-2}

$$VMB = (1{,}1 \cdot 10^4 \cdot C_4 \cdot t_2^{\,0,25} m^{-2}) \cdot 1/t_2 = 1{,}1 \cdot 10^4 \cdot C_4 \cdot t_2^{\,-0,75} Wm^{-2} \qquad \textbf{(3.7)}$$

nach *t* aufgelöst::

$$t_2 = \left(\frac{VMB}{1{,}1 \cdot 10^4 \cdot C_4} \right)^{-4/3} s \qquad \textbf{(3.8)}$$

mit *VMB* in Wm^{-2}

Die Berechnungen wurden für verschiedene Laser (cw-mode) mit verschiedenen Wellenlängen, maximalen Ausgangsleistungen sowie unterschiedlichen Brennweiten der Fokussieroptik für verschiedene Abstände der Hand zum Laserstrahl durchgeführt.

Szenario 1a)

In Abb. 3.9 sind für verschiedene Lasertypen in Verbindung mit unterschiedlichen strahlformenden Optiken (Brennweite) die berechneten *VMB* in einem Abstand von 150 mm zur Prozesszone angegeben.

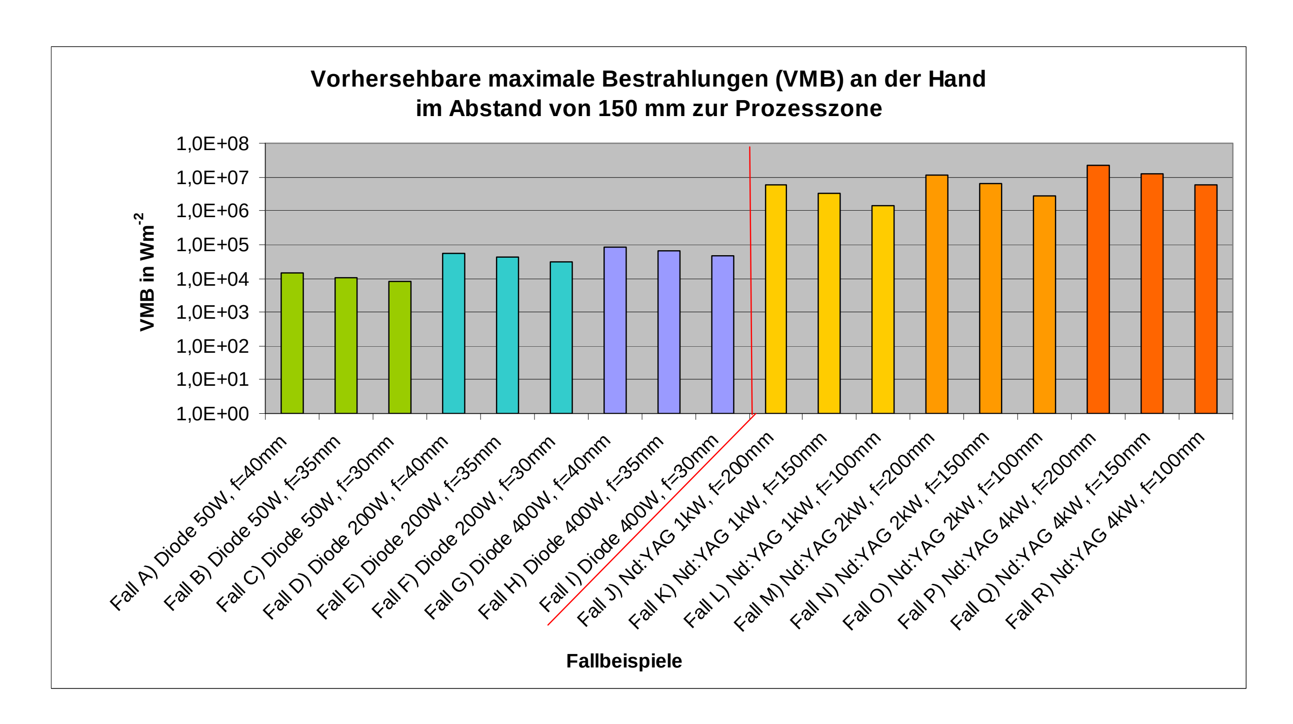


Abb. 3.9 *VMB* für verschiedene Lasertypen und strahlformende Optiken (Brennweite)

Bei Gleichsetzung der *VMB* mit den MZB_{Haut} gemäß DIN EN 60825 berechnen sich die in Abb. 3.10 angegebenen maximal zulässigen Expositionszeiten t_2.

Aus dem Diagramm kann geschlossen werden, dass für High-Power Laser die als Term t_2 zu addierenden maximal zulässigen Expositionszeiten äußerst gering sind. Sie bewegen sich im Bereich von 0,5 ms bis ca. 10 ms. Dieses bedeutet, dass falls der Laserstrahl an der Abschirmung des HLG vorbei in den Raum propagiert, unmittelbare Gefahr besteht. Die maximal zulässige Nachlaufzeit des HLG wird daher maßgeblich durch den Term t_1 bestimmt.

Anders verhält es sich bei Diodenlasern im Bereich bis 400 W und Brennweiten bis max. 40 mm. Die maximal zulässigen Expositionszeiten im Abstand von 150 mm liegen in Bereichen zwischen 100 ms und mehreren Sekunden.

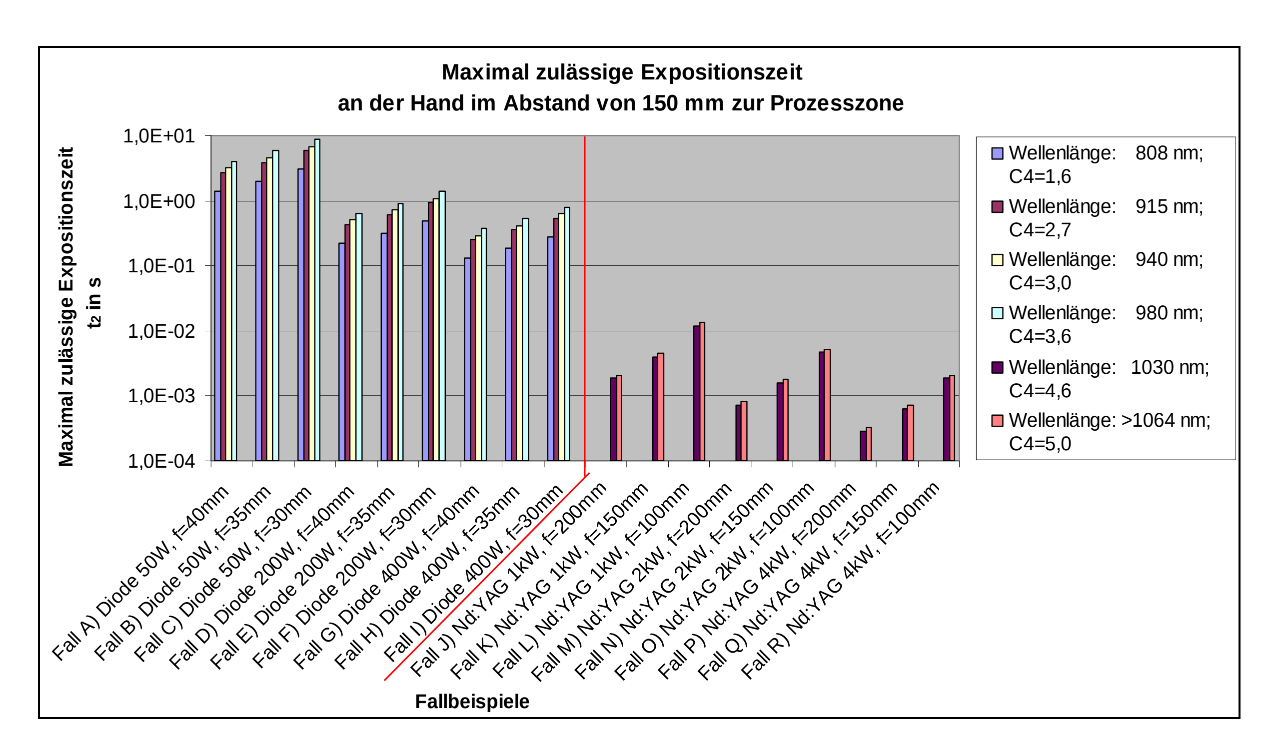


Abb. 3.10 Maximal zulässige Expositionszeiten für verschiedene Lasertypen und strahlformende Optiken (Brennweite)

<u>Szenario 1b)</u>
Die in der Prozesszone nahe zum Bearbeitungsspot auftretenden *VMB* sind sowohl bei den meisten Anwendungen von Diodenlasern [1] und insbesondere bei Hochleistungslasern größer oder sehr viel größer als 10^6 W/m². Der Beitrag des Expositionsterms t_2 zur maximal zulässigen Nachlaufzeit t_{zN} beträgt daher meist unter 10 ms.

Im Folgenden sind Betrachtungen zum Einfluss des Terms t_1, d. h. des Abstandes der Hand zur Zone der Laserstrahlungsexposition erläutert.

In Abb. 3.11 sind für verschiedene Abstände d vom HLG-Handgriff (Zustimmschalter) zur Zone/zum Punkt der Laserstrahlungsexposition für verschiedene Greifgeschwindigkeiten K_1 bis K_3 die sich ergebenden maximal zulässigen Nachlaufzeiten t_1 angegeben.

Abb. 3.11 bestätigt unmittelbar, dass mit zunehmendem Abstand die maximal zulässigen Nachlaufzeiten ansteigen. Selbst bei einer angesetzten Greifgeschwindigkeit von K_1 = 1000 mm/s muss zur Erreichung einer maximal zulässigen Nachlaufzeit von 100 ms ein Sicherheitsabstand von 100 mm eingehalten werden.

---

[1] abgesehen von besonderen Anwendungen z. B. mit Rechteckfokus größerer Fläche

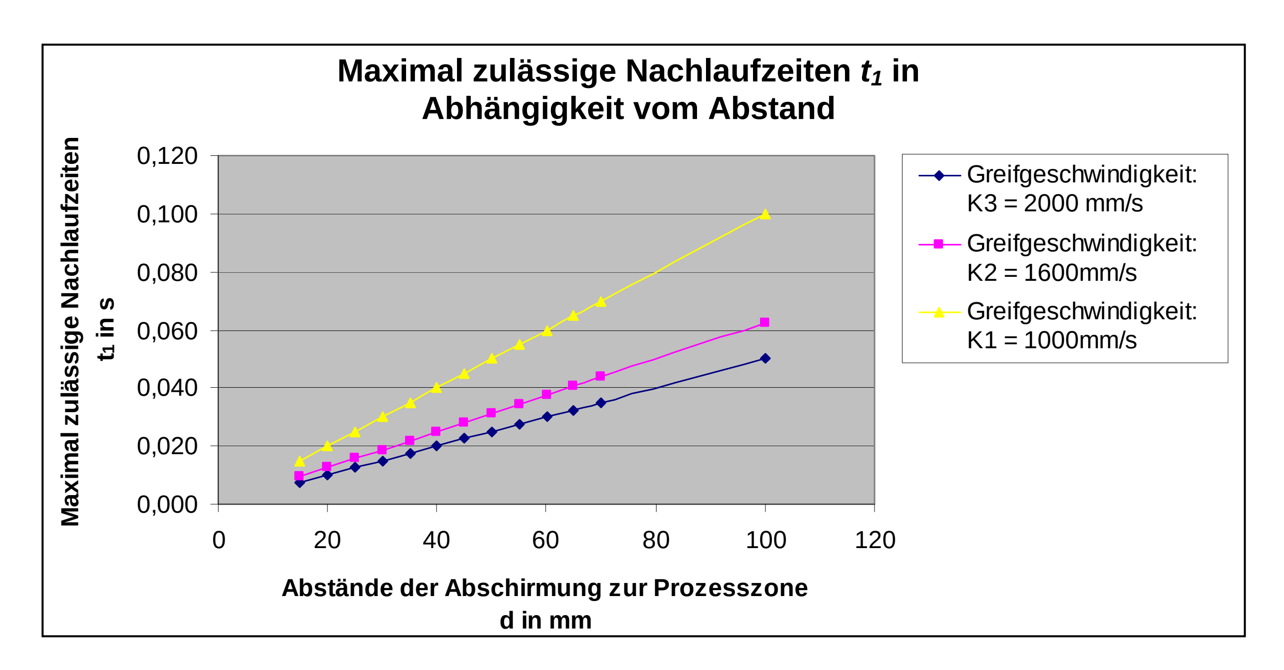


Abb. 3.11 Maximal zulässige Nachlaufzeiten t_1 für verschiedene Abstände vom HLG-Handgriff (Zustimmschalter) bis zur Zone/zum Punkt der Laserstrahlungsexposition für verschiedene Greifgeschwindigkeiten (die Werte für typische Greifgeschwindigkeiten sind derzeit in der Diskussion)

Beurteilung der Ergebnisse des Szenarios 1
Anhand der Ergebnisse kann Folgendes geschlossen werden.

1) Für die betrachteten Laser oberhalb ca. 1 kW Ausgangsleistung und Brennweiten zwischen 100 mm und 200 mm liegen die berechneten zulässigen Expositionszeiten t_2 in einem Abstand von 150 mm zur Prozesszone (in Strahlpropagationsrichtung) bei typischen *VMB* und gegebenen MZB_{Haut} im Bereich von 0,1 ms bis 5,0 ms. Verglichen mit der erreichbaren Abschaltzeit des Laserstrahls zwischen ca. 50 ms und 100 ms (siehe Abschnitt 6.5.1) sind die zulässigen Expositionszeiten t_2 in einem Abstand von 150 mm zur Prozesszone somit um ein bis zwei Größenordnungen niedriger.

Noch kritischer ist ein direkter Eingriff in die Prozesszone (fokusnaher Bereich) aufgrund der hohen vorhersehbaren Bestrahlungsstärken zu bewerten; die sich hier ergebenden zulässigen Expositionszeiten liegen deutlich unter 1 ms.

Für diese Laser kann eine Expositionsvermeidung bei gegebener Greifgeschwindigkeit zwischen 1000 mms^{-1} und 2000 mms^{-1} daher **nur** über die Vergrößerung des Abstandes der Extremität zum Laserstrahl erreicht werden, welche eine Zunahme der Zeit t_1 bewirkt. Bei einer angenommenen (kürzesten) Abschaltzeit des Laserstrahls durch die Sicherheitssteuerung von 50 ms sind Abstände d>100 mm zwischen der Extremität und dem Laserstrahl erforderlich. In [MEI08] sind typische Abstände von der Prozesszone zu verschiedenen Körperteilen beim Umgang mit HLG dargestellt.

2) Für die betrachteten Laser <1 kW Ausgangsleistung (hier: Diodenlaser) und Brennweiten zwischen 30 mm und 40 mm liegen die zulässigen Expositionszeiten t_2 in einem Abstand von 150 mm zur Prozesszone (in Strahlpropagationsrichtung) bei typischen *VMB* und gegebenen MZB_{Haut} im Bereich von 375 ms (0,4 s) bis 8740 ms (8,7 s).
Verglichen mit der erreichbaren Abschaltzeit des Laserstrahls zwischen ca. 50 ms und 100 ms sind die zulässigen Expositionszeiten in einem Abstand von 150 mm zur Prozesszone somit ausreichend bzw. um bis zu zwei Größenordnungen höher.

Für diese Laser kann eine mögliche schädigende Bestrahlung oberhalb der zulässigen Expositionsgrenzwerte bei gegebener max. Greifgeschwindigkeit von 2000 mms^{-1} und bei einem nominellen/theoretischen Abstand von 0 mm zwischen der Extremität und dem Laserstrahl (senkrecht zur Ausbreitungsrichtung) allein durch die Sicherheitssteuerung sicher verhindert werden (d. h. selbst wenn z. B. ein Finger in unmittelbarer Nähe des Laserstrahls (d = 0 mm) in den Strahl bewegt wird, kann durch die Sicherheitssteuerung der Laserstrahl vor Erreichen der zulässigen Expositionszeit t_2 sicher isoliert werden).
Bei einem direkten Eingriff in die Prozesszone (Bearbeitungsfleck/fokusnaher Bereich) sind aufgrund der hohen Bestrahlungsstärken allerdings nur sehr kurze Expositionszeiten unter 10 ms zulässig. Für diese Fälle kann die Sicherheit wiederum nur über den Abstand Hand zu Prozesszone/Zone der Laserstrahlungsexposition gewährleistet werden.

Szenario 2)

Szenario 2 basiert auf der Verwendung eines HLG mit teilgeschirmter Prozesszone. Das HLG verfügt über mindestens einen (oder zwei orthogonal zueinander stehende) Zustimmschalter, der außen am Gehäuse bzw. der Abschirmung montiert ist.

Fallunterscheidung:

a) Der Bediener verkippt das HLG einseitig, so dass der Laserstrahl von einem spiegelnden Werkstück an der Abschirmung vorbei in den Raum gerichtet reflektiert wird und dort Personen bzw. Extremitäten exponiert werden können. Beim Verkippen des HLG generiert mindestens ein Sensor ein Abschaltsignal.
b) Der Bediener verkippt das HLG (z. B. um eine Werkstückkante) und hebt es um einen Abstand d vom Werkstück ab, so dass der Laserstrahl von einem spiegelnden Werkstück an der Abschirmung vorbei in den Raum gerichtet reflektiert wird und dort Personen bzw. Extremitäten exponiert werden können. Beim Verkippen/Abheben des HLG generiert mindestens ein Sensor ein Abschaltsignal.

a) Einseitiges Verkippen

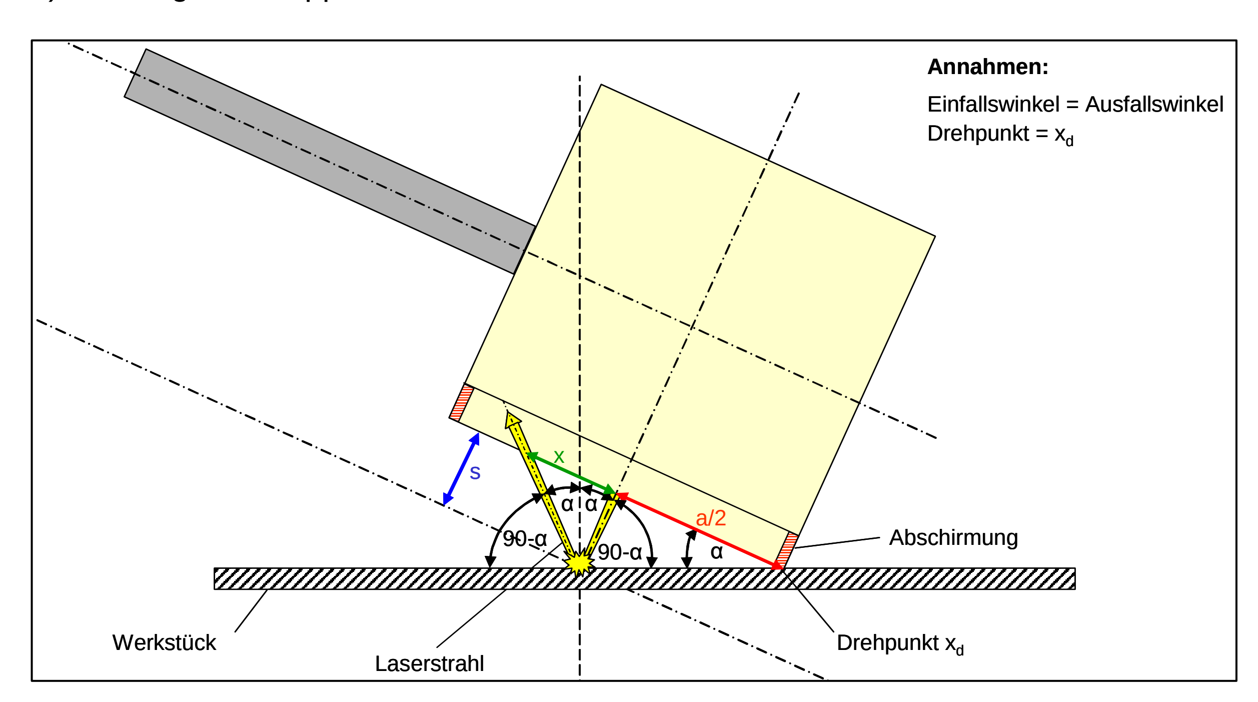


Abb. 3.12 Einseitige Verkippung des HLG um einen Winkel $\alpha < \alpha_{krit}$

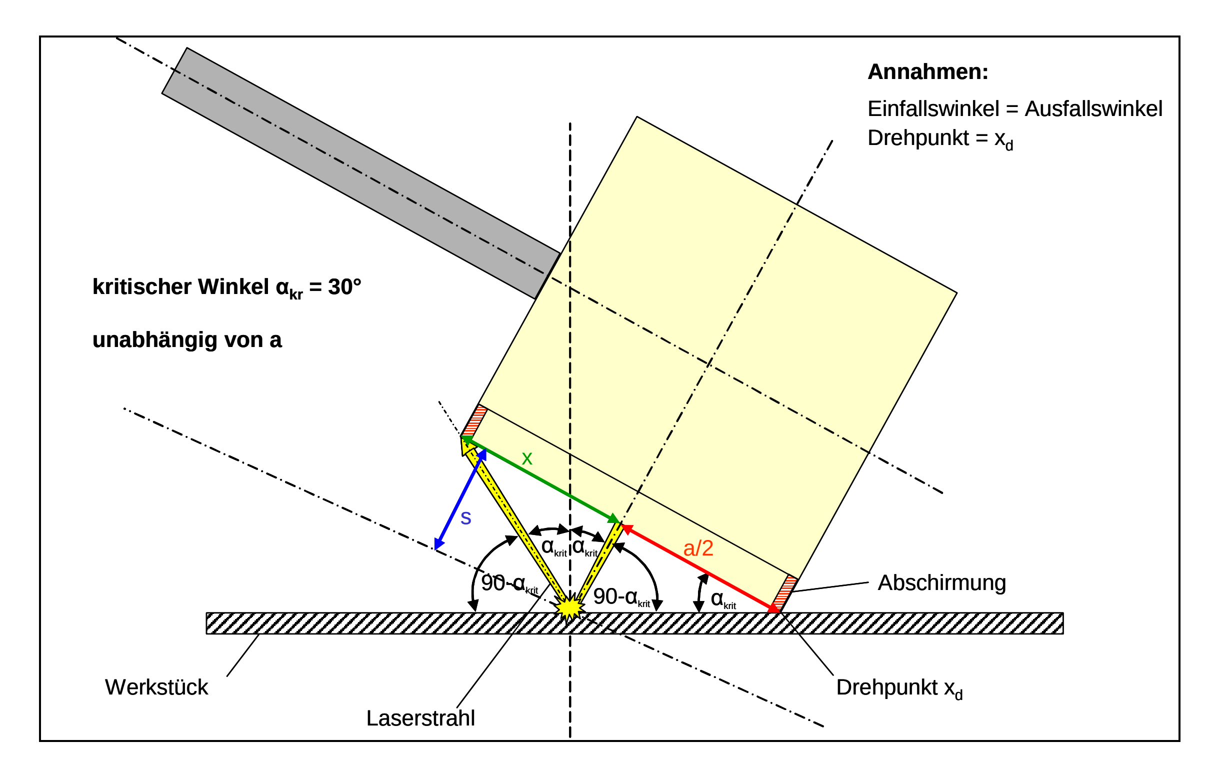


Abb. 3.13 Einseitige Verkippung des HLG um einen Winkel α_{krit}

Bezüglich der Propagation des Laserstrahls wird postuliert, dass auf einer reflektierenden Oberfläche der Ausfallswinkel gleich dem Einfallswinkel ist.

Folgende Beziehungen beschreiben die geometrischen Verhältnisse zwischen HLG, Werkstück und Laserstrahl.

1)

$$\tan\alpha = \frac{s}{0{,}5a} \quad \rightarrow \quad s = 0{,}5a \cdot \tan\alpha \qquad \textbf{(3.9)}$$

2)

$$\tan 2\alpha = \frac{x}{s} \quad \rightarrow \quad s = \frac{x}{\tan 2\alpha} \qquad \textbf{(3.10)}$$

Gl. 3.9 und Gl. 3.10 verknüpft:

$$0{,}5 \cdot a \cdot \tan\alpha = \frac{x}{\tan 2\alpha} \quad \rightarrow \quad \tan\alpha \cdot \tan 2\alpha = \frac{x}{0{,}5a} \qquad \textbf{(3.11)}$$

Bei dem kritischen Verkippungswinkel $\alpha = \alpha_{krit}$ wird $x \geq x_{krit} = 0{,}5a$.
α_{krit} berechnet sich nach Umstellen der Gleichung

$$\tan\alpha_{krit} \cdot \tan 2\alpha_{krit} = 1 \qquad \textbf{(3.12)}$$

zu

$$\alpha_{krit} = \arctan\sqrt{\frac{1}{3}} \qquad \textbf{(3.13)}$$

Der kritische Verkippungswinkel α_{krit}, ab dem der reflektierte Laserstrahl außen an der Abschirmung vorbei in den Raum propagiert (und nicht mehr von der Abschirmung begrenzt wird), ist somit unabhängig von dem Durchmesser der Abschirmung und beträgt $\alpha_{krit} = 30^\circ$.

b) Verkippen und Abheben um eine Distanz *d*

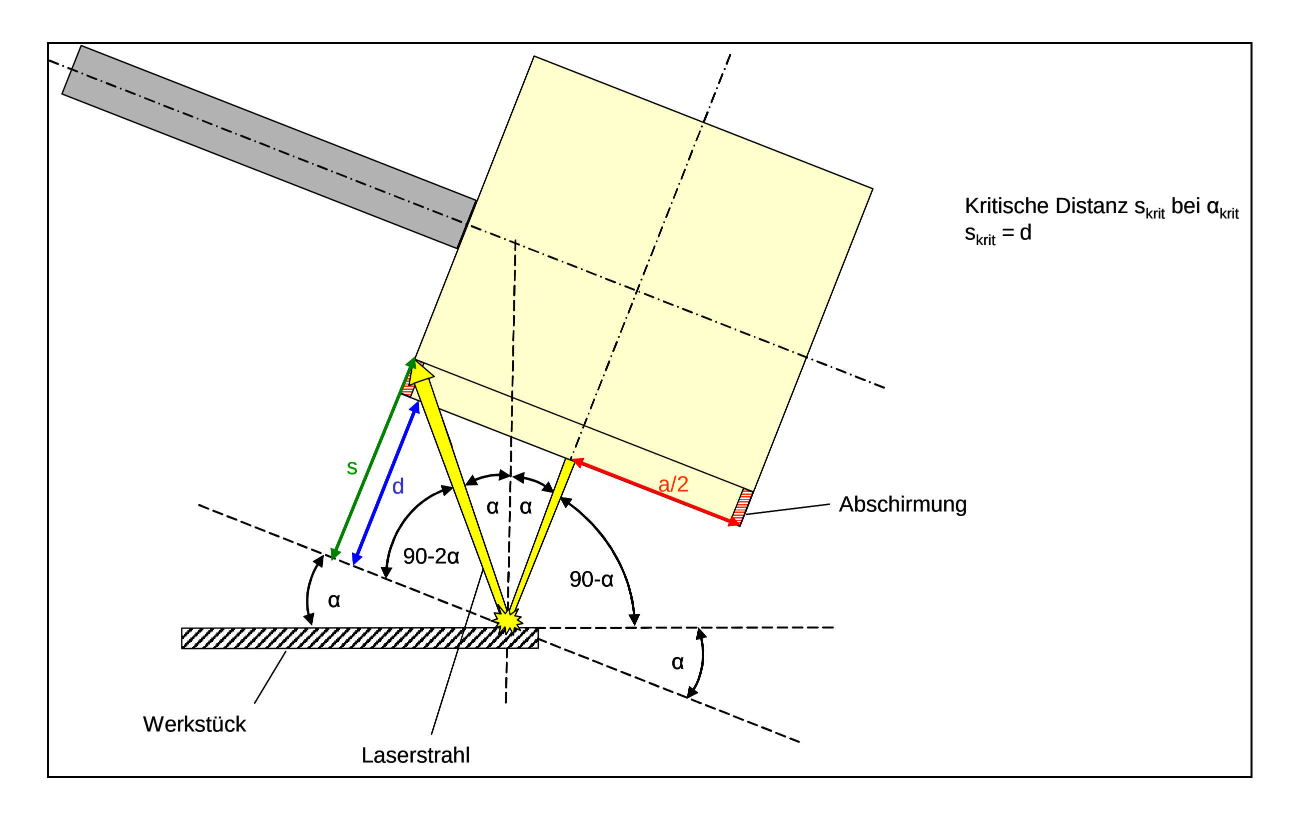


Abb. 3.14 Verkippung des HLG um Mittellage um einen Winkel *α* und Abheben um eine Distanz *d*

Bezüglich der Propagation des Laserstrahls wird postuliert, dass auf einer reflektierenden Oberfläche der Ausfallswinkel gleich dem Einfallswinkel ist.
Folgende Beziehungen beschreiben die geometrischen Verhältnisse zwischen HLG, Werkstück und Laserstrahl.
1)

$$s = \frac{a}{2} \cdot \tan\left[90° - 2\alpha\right] \tag{3.14}$$

Bei dem kritischen Verkippungswinkel $\alpha = \alpha_{krit}$ und einem Abhebespaltmaß d wird $s \leq s_{krit} = d$.

$$d = \frac{a}{2} \cdot \tan\left[90° - 2\alpha_{krit}\right] \tag{3.15}$$

α_{krit} berechnet sich nach Umstellen dieser Gleichung zu

$$\alpha_{krit} = \frac{1}{2}\left(90 - \arctan\frac{2 \cdot d}{a}\right) \tag{3.16}$$

In Abb. 3.15 ist für verschiedene Durchmesser der HLG-Abschirmung der kritische Verkippungswinkel α_{krit} in Abhängigkeit vom Abhebespaltmaß *d* aufgetragen. Aus dem Diagramm wird deutlich, dass mit zunehmendem Abhebespaltmaß der kritische

Verkippungswinkel abnimmt. Mit wachsendem Durchmesser der Abschirmung muss das HLG um größere Winkel verkippt werden, damit die Laserstrahlung an der Abschirmung vorbei in den Raum propagiert. Eine größere Abschirmung bietet somit größere Sicherheitsreserven.

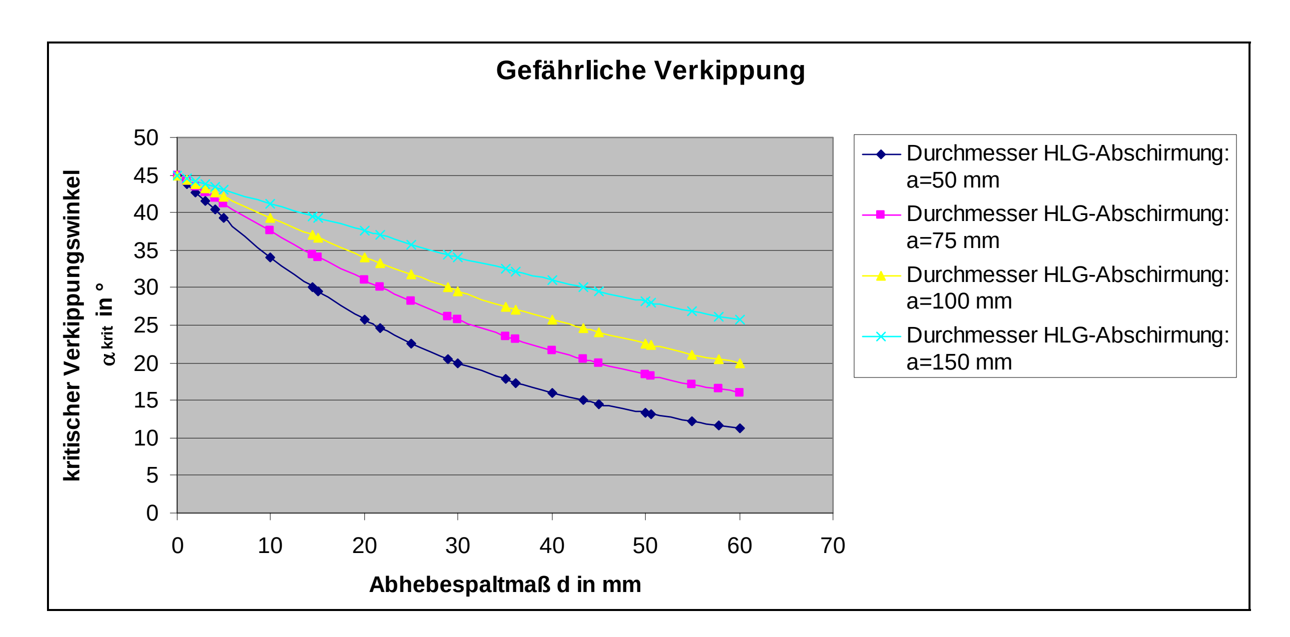


Abb. 3.15 Kritischer Verkippungswinkel α_{krit} in Abhängigkeit vom Spaltmaß d für ein beispielhaftes HLG

Berechnung der maximal zulässigen Nachlaufzeit für die Szenarien 2a und 2b
Die maximal zulässige „Nachlaufzeit" berechnet sich wiederum aus zwei Termen:

$$t_{zN} \leq t_1 + t_2 \qquad \textbf{(3.17)}$$

Als t_1 wird die Zeit bezeichnet, in der das HLG verkippt bzw. abgehoben wird. Als t_2 wird die maximal zulässige Expositionsdauer für die Haut bezeichnet, wie sie unter Szenario 1 bereits berechnet wurde (siehe auch Szenario 1).

Szenario 2a) Einseitiges Verkippen bis zum kritischen Verkippungswinkel

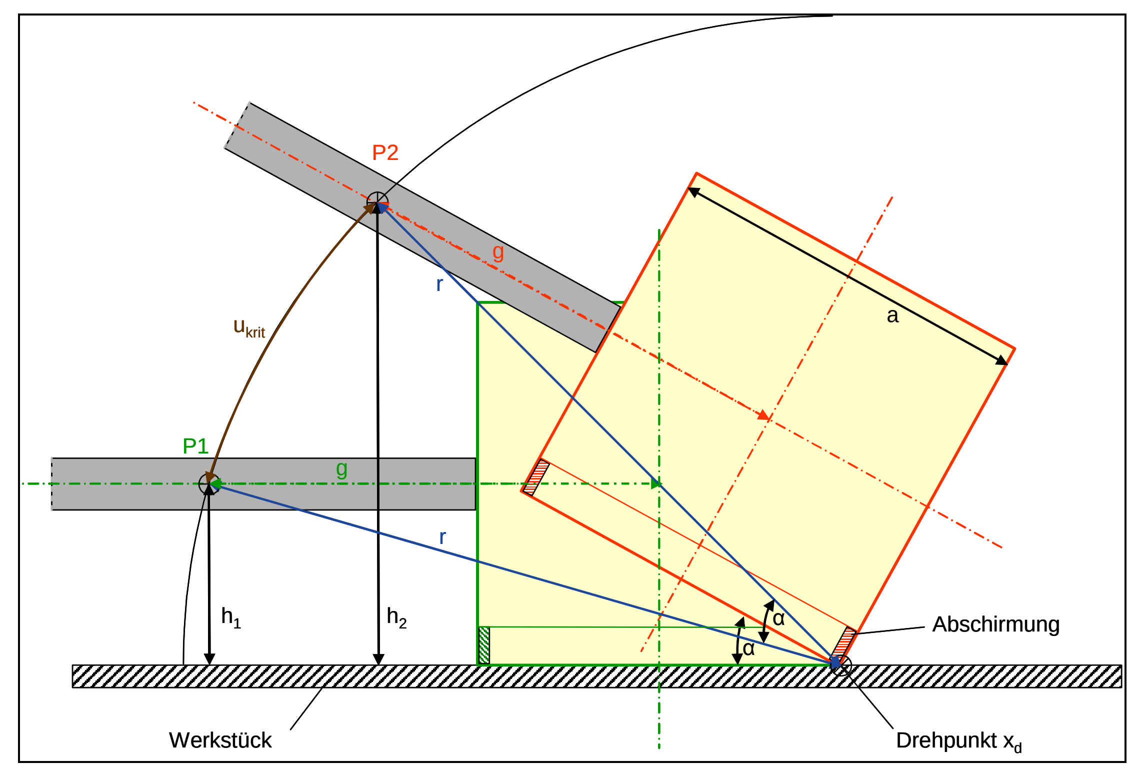


Abb. 3.16 Greifbewegung und -strecke bei einer einseitigen Verkippung des HLG um einen kritischen Winkel α_{krit}

Berechnet wurde die Greifstrecke vom Punkt P1 bis zum Punkt P2. Dabei wird postuliert, dass ein Griff am HLG in der Höhe h_1 von der Werkstückoberfläche montiert ist. Der geometrischer Schwerpunkt der Hand liegt in einem Abstand von g am Griff bezogen auf die HLG-Symmetrieachse.

Folgende Beziehungen beschreiben die geometrischen Verhältnisse zwischen HLG, Griff und Werkstück.

$$r = \sqrt{h_1^2 + \left(\frac{a}{2} + g\right)^2} \qquad \textbf{(3.18)}$$

Das Bogenstück (Griffweg) berechnet sich damit zu

$$u_{krit} = \frac{\pi \cdot r}{180°} \cdot \alpha_{krit} \quad \rightarrow \quad u_{krit} = \frac{\pi \sqrt{h_1^2 + \left(\frac{a}{2} + g\right)^2}}{180°} \cdot \alpha_{krit} \qquad \textbf{(3.19)}$$

Die maximal zulässige Nachlaufzeit berechnet sich hiermit zu

$$t_1 = \frac{u_{krit}}{K} \qquad \textbf{(3.20)}$$

Szenario 2b) Verkippen um Mittellage und Abheben

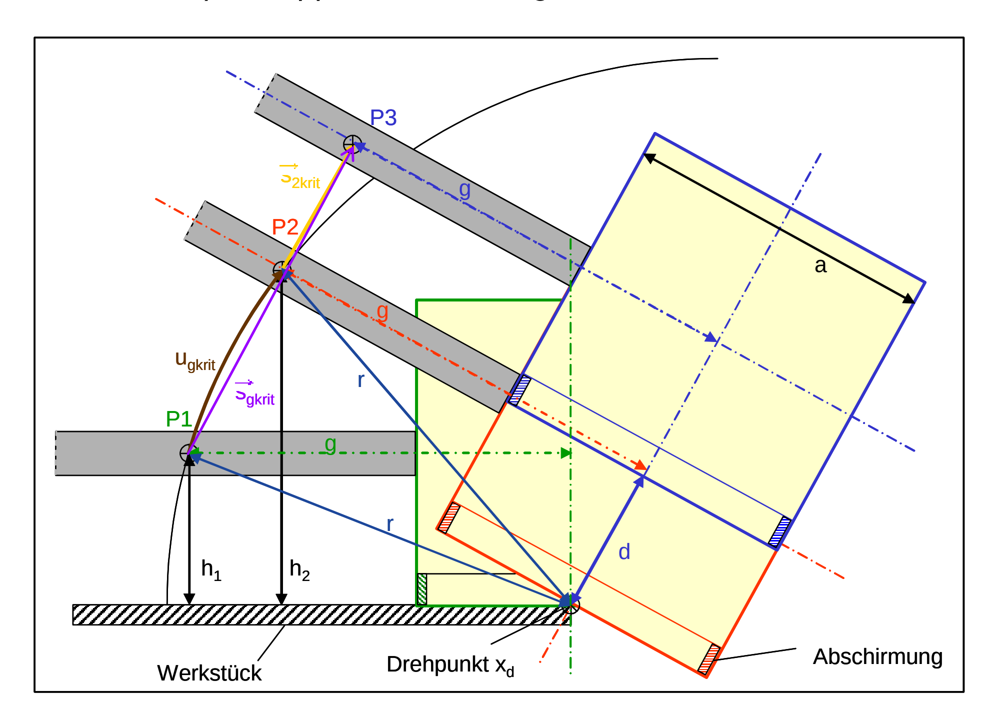


Abb. 3.17 Greifbewegung und -strecke bei einer einseitigen Verkippung des HLG um einen kritischen Winkel α_{krit} und Abheben um eine Distanz d_{krit}

Berechnet wurde die Greifstrecke vom Punkt P1 bis zum Punkt P3. Dabei wird postuliert, dass ein Griff am HLG in der Höhe h_1 von der Werkstückoberfläche montiert ist. Der geometrische Schwerpunkt der Hand liegt in einem Abstand von *g* am Griff bezogen auf die HLG-Symmetrieachse.

Ausgeführt wird eine Kippbewegung von Punkt P1 zu Punkt P2 ergänzt durch eine geradlinige Bewegung von Punkt P2 zu Punkt P3. Im ersten Ansatz werden die Streckenlängen addiert, ohne den resultierenden Streckenvektor $\vec{s}_{gkrit}$ zu bilden. Hierdurch ergeben sich für die Greifstrecke höhere Werte, was bei gleicher Greifgeschwindigkeit zu höheren Werten für den zulässigen Nachlauf führt. Vergleichswerte bei einseitiger Verkippung verdeutlichen jedoch, dass der Fehler kleiner als 5 % ist. Dieses hat in der Konsequenz zur Folge, dass die maximal zulässige Nachlaufzeit um diesen Wert reduziert werden muss.

Folgende Beziehungen beschreiben die geometrischen Verhältnisse zwischen HLG, Griff und Werkstück.

$$r = \sqrt{h_1^2 + g^2} \qquad \textbf{(3.21)}$$

Das Bogenstück (Griffweg) berechnet sich damit zu

$$u_{gkrit} = \frac{\pi \cdot r}{180°} \cdot \alpha_{krit} \quad \rightarrow \quad u_{gkrit} = \pi\sqrt{h_1^2 + g^2} \cdot \frac{\alpha_{krit}}{180°} \qquad \textbf{(3.22)}$$

Die lineare Greifbewegung beträgt

$$s_{2krit} = d \qquad \textbf{(3.23)}$$

Die maximal zulässige Nachlaufzeit berechnet sich hiermit zu

$$t_1 = \frac{(u_{gkrit} + s_{2krit})}{K} \quad \rightarrow \quad t_1 = \frac{s_{gkrit}}{K} \qquad \textbf{(3.24)}$$

Beurteilung der Ergebnisse der Szenarien 2a und 2b

Im Folgenden sind die Ergebnisse für die Szenarien 2a und 2b für ein ausgewähltes HLG mit bestimmten geometrischen Verhältnissen (Abmessungen und Positionen der Zustimmtaster) grafisch dargestellt.

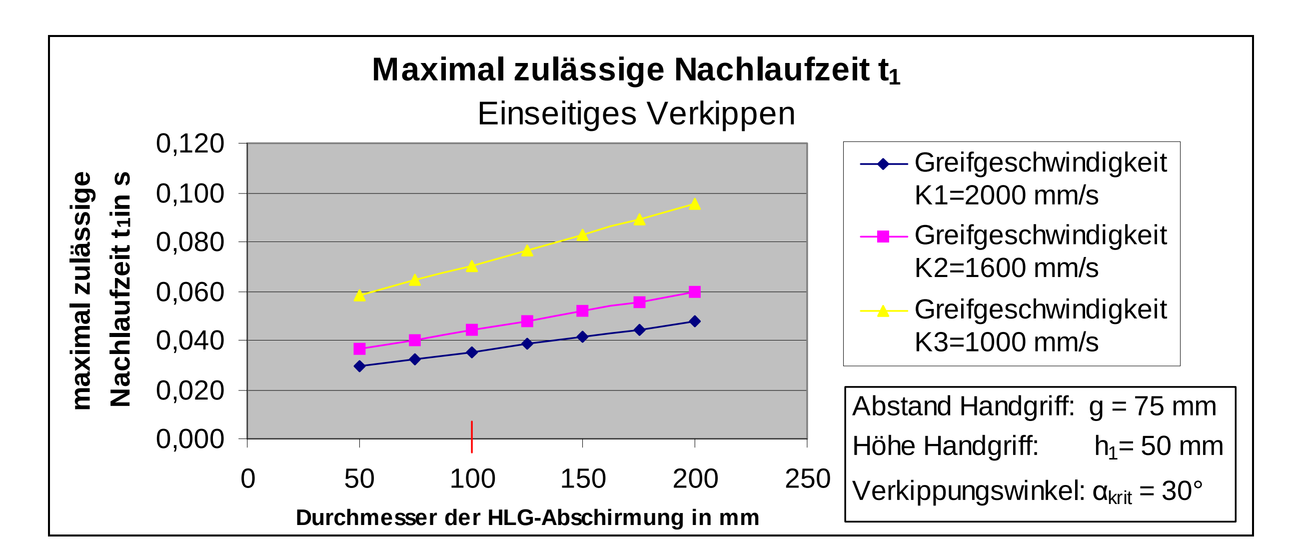


Abb. 3.18 Maximal zulässige Nachlaufzeiten t_1 für Szenario 2a (einseitiges Verkippen) in Abhängigkeit der Greifgeschwindigkeit für ein beispielhaftes HLG

Wie aus Abb. 3.18 ersichtlich, werden die Nachlaufzeiten entscheidend von den Greifgeschwindigkeiten bestimmt. Unter Berücksichtigung einer Greifgeschwindigkeit von K_3 = 1000 mm/s für zielorientiertes Greifen ergibt sich bei einem Durchmesser der HLG-Abschirmung von 100 mm eine Nachlaufzeit von t_1 zu 95 ms. Größere Durchmesser der Abschirmung des HLG und größere Abstände des Griffschwer-

punktes zur HLG-Symmetrieachse haben größere Griffradien zur Folge; diese verlängern die Greifstrecke und bieten damit größere Sicherheitsreserven.

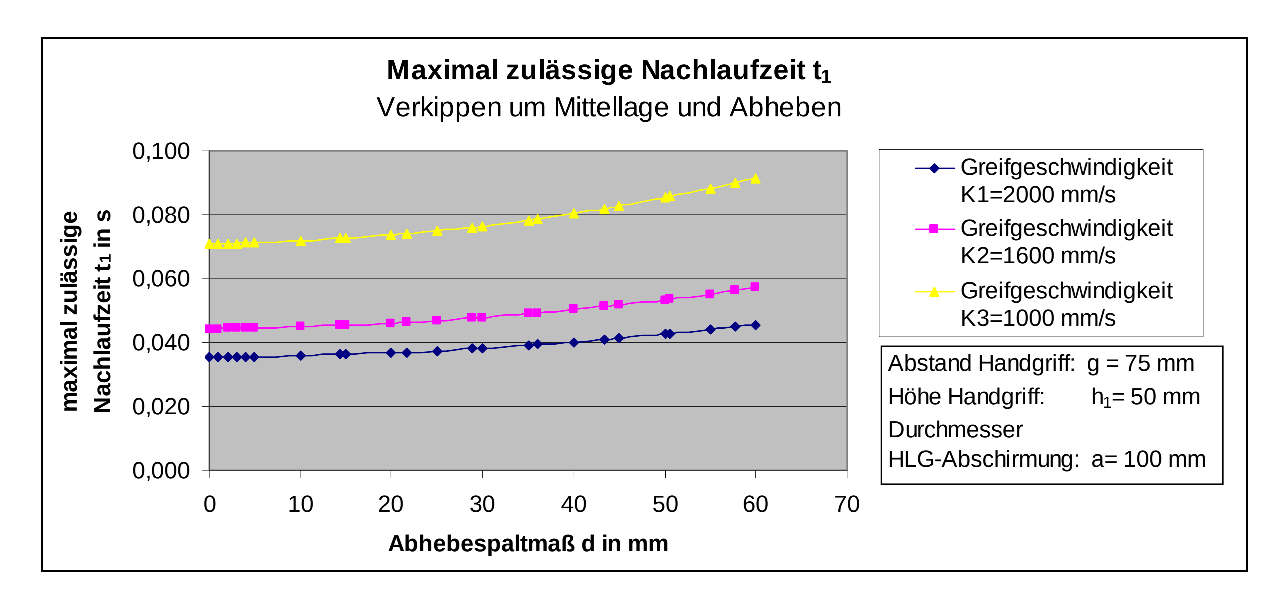


Abb. 3.19 Maximal zulässige Nachlaufzeiten t_1 für Szenario 2b (Verkippen um Mittellage und Abheben) in Abhängigkeit der Greifgeschwindigkeit für ein beispielhaftes HLG

Ähnliche Größenordnungen der Nachlaufzeit t_1 ergeben sich für das Szenario „Verkippen um Mittellage und Abheben". Die ermittelten maximal zulässigen Nachlaufzeiten für eine Greifgeschwindigkeit von K_3 = 1000 mm/s betragen in Abhängigkeit des Abhebespaltmaßes d und des sich daraus ergebenden kritischen Verkippungswinkels α_{krit} zwischen 70 ms und 90 ms. Obwohl sich mit höherem Abhebespaltmaß der kritische Verkippungswinkel verringert, ergibt sich infolge der Summation von Verkippen und Abheben eine längere Greifstrecke und damit eine größere maximal zulässige Nachlaufzeit. Eine Vergrößerung des Durchmessers der HLG Abschirmung bzw. damit verbunden des Griffschwerpunkts zur HLG-Symmetrieachse auf g = 100 mm hat eine Verlängerung der Nachlaufzeit um ca. 10 % zur Folge.

In Verbindung mit den unter Szenario 1 ermittelten maximal zulässigen Nachlaufzeiten t_2 lässt sich schlussfolgern, dass für Hochleistungslaser der Term t_1 für die maximal zulässige Gesamtnachlaufzeit t_{zN} bestimmend ist. Die Werte für t_{zN} bzw. t_1 (für Hochleistungslaser) sind den Gesamt-Systemreaktionszeiten der Sicherheitssteuerung für die Isolierung oder Deaktivierung der Laserstrahlung gegenüberzustellen.

3.2.3 Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung anhand der erforderlichen Performance Level (PL_r)

Laserstrahlung wird gemäß der Klassifikation der Gefährdungsfaktoren [GRU08] zur Gruppe 7 „Gefährdungen durch spezielle physikalische Einwirkungen" und im Speziellen der Untergruppe 7.5 „nicht-ionisierende Strahlung" zugeordnet.

Als Bewertungsschema wird im Folgenden der Risikograph zur Bestimmung des required Performance Level (PL_r) für jede Sicherheitsfunktion und jedes sicherheitsbezogene Bauteil der Steuerung (SRP/CS) gemäß der DIN EN ISO 13849-1:2006

verwendet. In Abb. 3.20 ist der Risikograph zur Bestimmung des PL_r für jede Sicherheitsfunktion dargestellt.

Das Verfahren ermöglicht die Bestimmung des PL_r in Abhängigkeit von drei Parametern:

- Schadensausmaß **S**
- Häufigkeit und/oder Dauer der Gefährdungsexposition **F**
- Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung oder Begrenzung des Schadens **P**

Anleitungen zur Auswahl der Parameter S, F und P zur Einschätzung des Risikos und zur Bestimmung des PL_r sind in der DIN EN ISO 13849-1 detailliert beschrieben.

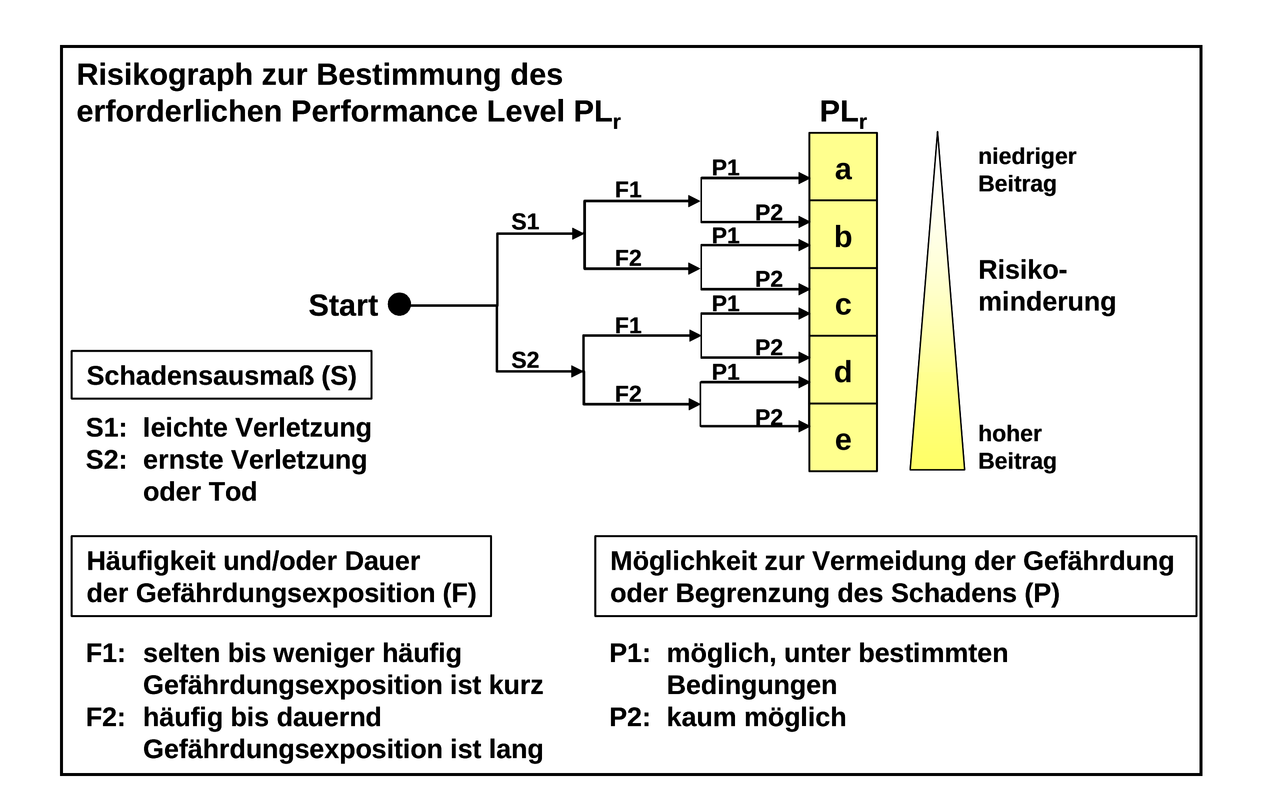


Abb. 3.20 Risikograph zur Bestimmung des PL_r für jede Sicherheitsfunktion gemäß DIN EN ISO 13849-1

In Zusammenhang mit HLG wird bezüglich der Bewertung der Risikoparameter (S, F, P) von nachstehend erläuterten Setzungen/Postulaten ausgegangen:

S = Schwere der Verletzung

1) Verbrennungen der Haut

Die Schweregrade der Verbrennungen richten sich nach der Tiefe des Gewebeschadens (vgl. dazu z. B. [MOR47, STO68, STO69]).

Verbrennungen 1. Grades: Bei Verbrennungen 1. Grades wird die Oberhaut geschädigt. Bei der Heilung entstehen keine Narben. Die Verletzung ist reversibel (S1).

Verbrennungen 2. Grades: Geschädigt werden Oberhaut und Lederhaut. Bei Verbrennungen 2. Grades bleiben die Haarwurzeln, die Drüsen und Rezeptoren der Haut intakt. Der Heilungsprozess kann mehrere Wochen dauern. In der Regel verbleiben keine Narben; jedoch können irreversible Pigmentstörungen in den belasteten Hautzonen auftreten (S1-S2).

Verbrennungen 3. Grades: Verbrennungen 3. Grades sind tiefgreifende Zerstörungen der Haut. Geschädigt werden die Oberhaut, die Lederhaut und i. d. R. auch das Unterhautfettgewebe. Blutgefäße werden zerstört. Bei der Heilung entstehen Narben, die im Bereich von Gelenken zu Bewegungseinschränkungen führen können. Diese Verletzung ist irreversibel (S2).

Bei der Schädigung der Haut durch Laserstrahlung und/oder laserinduzierter Wärmestrahlung wird bei kleinen Bestrahlungsstärken und -dauern von einer reversiblen Schädigung ausgegangen (S1). Schwerere Verbrennungen 2. Grades sowie insbesondere Verbrennungen 3. Grades werden bezogen auf die Risikoparameter als irreversible Verletzungen (S2) angesehen.

2) Schädigungen des Auges

Bei den betrachteten Ausgangsleistungen kann postuliert werden, dass bei einer Bestrahlung im Fehlerfall durch einen direkten oder gerichtet reflektierten Laserstrahl irreversible Schädigungen des Auges die Folge sind. Angesetzt wird somit der Risikoparameter S2.

F = Häufigkeit und Dauer der Gefährdungsexposition

Unterschieden werden zwei charakteristische Ereignisse.

1) Infolge von zufälligen/statistischen Fehlern wird Strahlung emittiert, die kurzzeitig für die Haut bzw. das Auge zugänglich ist. Typische Beispiele sind u. a. Faserbruch, Lösen eines Fasersteckers, auftretende Strahllageverschiebungen in der HLG internen Strahlführung, zufälliges Versagen von Auflagekontrollen (SIPO). Angesetzt wird hierbei der Risikoparameter F1.

2) Handelt es sich um latente Gefahren, hervorgerufen durch ungeeignete Auslegung des HLG (unkontrollierte Strahlfreigabe aufgrund fehlerhafter Steuerung, konstruktionsbedingt nicht angemessene Abschirmung des Prozessbereiches oder nicht funktionale Überwachungssensoren, häufige Gefährdungsexposition durch gerichtet oder diffus reflektierte Strahlung in Richtung des Bedieners), ist die Zeit der Gefährdungsexposition als lang zu bezeichnen. Angesetzt wird hierbei der Risikoparameter F2.

P = Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung oder Begrenzung des Schadens

1) In Bezug auf die Verbrennungen der Haut wird postuliert, dass der Rückziehreflex existent [SCH87] ist. Nach Schmerzempfindung und nachfolgendem polysynaptischen Reflex kann die Expositionszeit begrenzt werden (max. 4 s). Unterstützt wird dieses durch visuelle Wahrnehmungen (Rauchentwicklung am Handschuh/Kleidung; wenn nicht mit nackter Haut sondern PSA geringer Schutzfunktion gearbeitet wird). Angesetzt wird der Risikoparameter P1. Ausnahme sind hohe Bestrahlungsstärken ($> 10^5$ W/m²) bei Lasern entsprechend hoher Ausgangsleistung und langen Brennweiten, die innerhalb der Reflexzeit zu Verbrennungen 3. Grades führen können (S2).

2) In Bezug auf das Auge kann postuliert werden, dass bei unbeabsichtigter Laserstrahlungsexposition im nicht sichtbaren Bereich (CO_2-Laser, Festkörperlaser, Faserlaser, Diodenlaser) eine Exposition nicht unmittelbar erkannt wird und somit eine Vermeidung der Gefährdung oder Begrenzung des Schadens kaum möglich ist. Generell wird in diesen Fällen das nackte/ungeschützte Auge betrachtet. Angesetzt wird der Risikoparameter P2. Dieses Postulat muss insbesondere dann angesetzt werden, wenn es sich um HLG mit Prozessabschirmungen handelt, die der Klasse GZS 1 zugeordnet werden.

Zu berücksichtigen ist, dass sich bei Tragen von geeignetem Augenschutz (Laserschutzbrille) andere Risikoparameter (S, F, P) ergeben.

Unterteilung der HLG-Typen in 3 Risikogruppen

Zur besseren (HLG applikationsangepassten) Beurteilung des erforderlichen Beitrags der SRP/CS zur Risikominderung werden die HLG in 3 unterschiedliche Risikogruppen mit Bezug auf die mittlere Ausgangsleistung (bei vergleichbaren Strahlparametern/Brennweiten) unterteilt:

Gruppe 1: HLG mit $p_m < 100$ W
Gruppe 2: HLG mit $p_m < 1000$ W
Gruppe 3: HLG mit $p_m > 1000$ W

In allen Fällen wird von einer Brennweite von 200 mm ausgegangen.
Bewertet wird der erforderliche Beitrag der SRP/CS zur Risikominderung für die Augen sowie für die Haut (beides nackt).

Mit steigender Gruppennummer nimmt das Risiko insbesondere bezüglich der Haut (Schwere der Verbrennungen) zu. Da im Vergleich zur Haut die maximal zulässigen Bestrahlungsstärken des Auges (MZB_{Auge}) deutlich geringer sind, ist das Risiko für Augenverletzungen auch schon bei der Gruppe 1 als hoch zu bezeichnen.

Unterschiede der HLG Bauarten/Typen (geschlossenes System mit Werkstück ist quasi Laser Klasse 1, offenes System ist Laser Klasse 4) werden in der Rubrik „Bemerkungen“ für Einzelfälle betrachtet. Generell ist hier anzumerken, dass Augenverletzungen bei HLG-Bauarten, die bestimmungsgemäß als Laser Klasse 1 ohne PSA (Laserschutzbrille) betrieben werden können, bei einer fehlerhaften Bestrahlung des Auges oberhalb den MZB_{Auge}-Werten (Strahlaustritt aus HLG oder abgeschirmten Prozessbereich) ein sehr hohes Risiko darstellen. Im Vergleich treten bei HLG mit offenen Prozesszonen Augenschäden nur auf, wenn wider den Tragegeboten (bei Laser Klasse 4 obligatorisch) keine oder keine geeignete PSA benutzt wird; das Risiko ist somit auf die PSA (organisatorisch/persönlicher Bereich) verlagert.

3.3 Bestimmung des erforderlichen Performance Levels (PL_r)

In Abhängigkeit der auszuführenden Sicherheitsfunktion werden definierte Anforderungen an die Eigenschaften der SRP/CS gestellt (required Performance Level: PL_r). Die Anforderungen ergeben sich aus dem Grad der Risikominderung, der mit der vorgesehenen Sicherheitsfunktion bzw. durch die betrachteten sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung erreicht werden soll (hohe Risikominderung = hoher PL_r).

Dieses bedeutet, dass für jede Sicherheitsfunktion, die durch eine spezielle Kombination von SRP/CS verarbeitet wird, ein entsprechender erforderlicher Performance Level (PL_r) bestimmt werden muss.

Nach Feststellung der entsprechenden Sicherheitsfunktion (siehe Abschnitt 5.2.2) wird auf Basis der Erkenntnisse über Kombinationen von SRP/CS, die bereits in HLG verwendet werden, und weiteren technisch sinnvollen Kombinationen zur Verarbeitung der Sicherheitsfunktionen zunächst eine tabellarische Übersicht erstellt. In der Tabelle sind eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren und Kombinationen von SRP/CS aufgelistet. Die Tabelle bezieht aber auch Signalverarbeitungseinheiten (Logik) und Aktuatoren mit ein.

Die entsprechende Tabelle befindet sich im Anhang 3 dieses Berichts.

3.3.1 Rückschlüsse aus der Bestimmung der erforderlichen Performance Level (PL_r)

Der Tabelle in Anhang 3 ist zu entnehmen, dass sich für den Performance Level PL_r bei Betrachtung des nackten Auges Level zwischen PL_r=c und PL_r=e ergeben können. Bestimmend für die Unterschiede ist im Wesentlichen der Parameter F (Häufigkeit und Dauer der Gefährdungsexposition). Bei permanent während der Anwendung von HLG mit offener Prozesszone emittierter gerichteter oder diffuser Laserstrahlung ergeben sich $PL_r \geq d$. Bei systematischen Fehlern im Design oder der Steuerung des HLG resultieren durch die latente Gefahr ebenfalls Werte von $PL_r \geq d$, oftmals auch PL_r=e.

Bezogen auf die nackte Haut steigt das Risiko mit zunehmender Ausgangsleistung. Hierdurch verändern sich die Risikoparameter S, F, P (insbesondere S), was zu erforderlichen Performance Leveln von PL_r=a bis PL_r=d führt. Die Unterschiede zum Auge werden zum einen in der besseren Wahrnehmung eines Fehlerfalles gesehen (Möglichkeit des Rückziehreflexes → F1). Auch kann bei kleineren Ausgangsleistungen (p_m<100 W) oder Erwärmungen des HLG-Gehäuses eine leichte Verletzung (S1) der Haut toleriert werden.

3.3.2 Ermitteln der sicherheitstechnischen Qualität der SRP/CS anhand des PL

Nach Festlegung der spezifischen Sicherheitsfunktion und nach Abschluss des Verfahrens zur Bestimmung des <u>erforderlichen</u> Performance Levels PL_r erfolgt die konstruktive Auslegung der SRP/CS bzw. der Kombinationen von SRP/CS.

Dabei kommt der Struktur oder Architektur der Sicherheitssteuerung eine entscheidende Bedeutung zu. Sie bestimmt maßgeblich die sicherheitstechnische Qualität der Steuerung u. a. die konstruktive Sicherheit zur Verhinderung systematischer Aus-

fälle sowie die Toleranz gegenüber Fehlern. Auch stellt sie die Basis für alle quantifizierbaren Aspekte dar, anhand derer der Performance Level PL der sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung ermittelt wird.

Der PL der SRP/CS bzw. ihrer Kombinationen muss durch eine Abschätzung folgender Aspekte bestimmt werden:

- Mean Time To Failure dangerous, mittlere Zeit bis zum gefahrbringenden Ausfall einzelner Bauteile ($MTTF_d$-Wert)
- Diagnosis Coverage, Diagnosedeckungsgrad (DC)
- Common Cause Failure, Ausfälle aufgrund gemeinsamer Ursachen (CCF)
- Struktur der Steuerung
- Verhalten der Sicherheitsfunktion unter Fehlerbedingungen
- Sicherheitsbezogener Software
- Systematischer Ausfälle
- Fähigkeit, eine Sicherheitsfunktion unter vorhersehbaren Umgebungsbedingungen auszuführen

Das Verfahren sowie Beispiele für die Abschätzung oben genannter Aspekte sind in der DIN EN ISO 13849-1 ausführlich erläutert. Daneben gibt es in der Literatur eine Reihe weiterer Anwendungshilfen (u. a. [HAU08]).

In den folgenden Abschnitten werden beispielhaft technische Einrichtungen bzw. Bauelemente von HLG beschrieben, die als sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen in Verbindung mit einer Sicherheitssteuerung eine gefährliche Exposition von Personen durch Laserstrahlung bei bestimmungsgemäßer Verwendung und insbesondere in vorhersehbaren Fehlerfällen des HLG weitestgehend verhindern sollen. Sie sind somit integrale Bestandteile einer geforderten inhärent sicheren Konstruktion eines HLG.

Die Abschnitte gliedern sich in die Beschreibung der

- ausgewählten Sensoren,
- ausgewählten und/oder erstellten Signalverarbeitungseinheiten,
- Logikeinheit bzw. der Sicherheits-Kleinsteuerung,
- Aktuatoren im Lasergerät,
- Architektur der Steuerung (Funktionsbeschreibung und konstruktive Merkmale),
- Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit.

Dabei wird der in Abschnitt 4.1 beschriebene iterative Prozess zur Gestaltung sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen angewendet. Dieses umfasst die Abschätzung des PL der SRP/CS (u. a. anhand der von den Herstellern angegebenen Daten wie u. a. $MTTF_d$) und der Kombinationen sowie den Vergleich mit dem zuvor ermittelten PL_r.

Da die Signalübermittlung vom HLG zu der Sicherheitssteuerung des Lasergerätes wie auch der Betrieb von Hilfseinrichtungen (u. a. Vorschubmotor) typischerweise elektrisch erfolgt, wird ebenfalls auf die elektrische Sicherheit von HLG eingegangen.

4 Lösungsansätze für konstruktive Sicherheitseinrichtungen für HLG

4.1 Identifizieren notwendiger Sicherheitsfunktionen und deren Eigenschaften

Ist das Ergebnis der Risikobeurteilung für eine Maschine oder ein Gerät derart, dass das Risiko ohne Schutzmaßnahmen inakzeptabel – da zu hoch – ist, muss eine Risikominderung erfolgen.
Dieses kann prinzipiell erreicht werden durch

- konstruktive Maßnahmen ohne sicherheitsrelevante Steuereinrichtungen sowie
- sicherheitsrelevante Steuerungseinrichtungen.

Werden sicherheitsrelevante Steuerungseinrichtungen eingesetzt, so sind Sicherheitsfunktionen zu definieren, die von den sicherheitsbezogenen Teilen von Steuerungen (Safety Related Parts of Control Systems, SRP/CS) ausgeführt werden.

Die Verarbeitung einer typischen Sicherheitsfunktion durch eine Kombination von SRP/CS kann prinzipiell als Blockschaltbild dargestellt werden. Unterteilt werden dabei folgende funktionale Blöcke (Abb. 4.1).

- Sensor
- Logik/Auswerteeinheit
- Aktuator

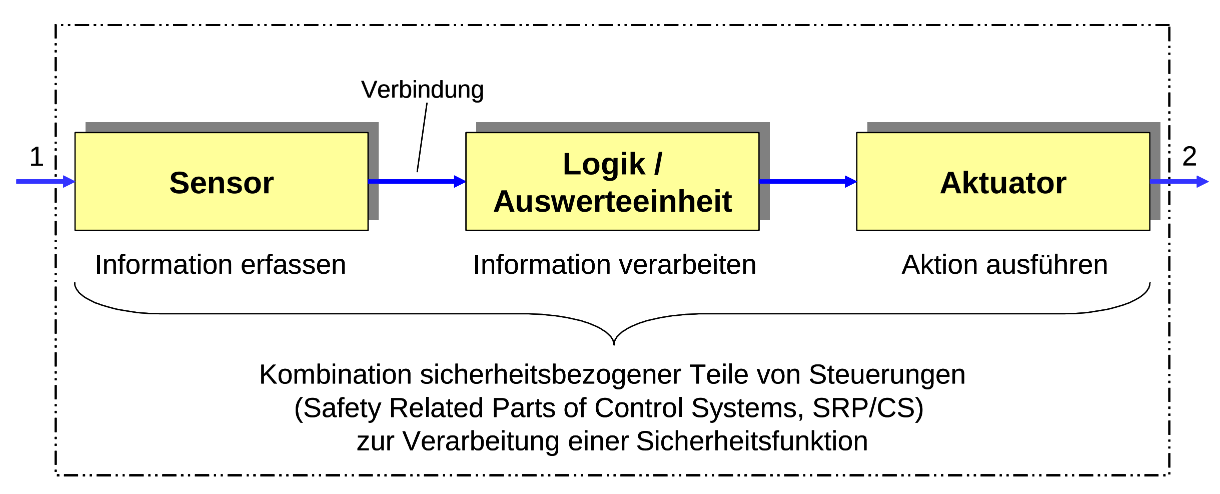


Abb. 4.1 Schematische Darstellung einer Sicherheitsfunktion, die von SRP/CS ausgeführt werden

In der DIN EN ISO 12100-1 werden direkt und indirekt wirkende Sicherheitsfunktionen beschrieben. Unter direkt wirkenden Sicherheitsfunktionen versteht man Funktionen einer Maschine, deren Fehlfunktion unmittelbar das Risiko einer Verletzung oder Gesundheitsschädigung erhöhen würde.

Einen Teilbereich hiervon stellen die spezifischen Sicherheitsfunktionen dar. Dieses sind Sicherheitsfunktionen, die ausdrücklich auf ein Sicherheitsziel ausgerichtet sind, wie u. a.

- Sicherheitsfunktion, die unbeabsichtigtes/unerwartetes Anlaufen verhindert,

- Sicherheitsfunktion, die die Wiederholung eines Arbeitszyklus verhindert,
- Zweihandschaltungsfunktion, die verhindert, dass der Bediener während gefährlicher Vorgänge Gefahrenbereiche erreicht.

Für die Gestaltung dieser sicherheitsbezogenen Teile von Steuerungen ist wie bei dem Verfahren zur hinreichenden Risikominderung ein iterativer Prozess vorgesehen, der in der DIN EN ISO 13849-1 beschrieben ist.

Der Prozess versteht sich dabei als integraler Bestandteil des Verfahrens zur Risikobeurteilung gemäß DIN EN ISO 14121-1 und der Risikominderung gemäß DIN EN ISO 12100-1.

In Abb. 4.2 ist der Prozess zur Gestaltung sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen dargestellt. Die entsprechenden Schnittstellen zu den genannten Normen sind angegeben.

HLG und Identifikation notwendiger Sicherheitsfunktionen und Anforderungen an SRP/CS

Die Risikobeurteilung von HLG zur Materialbearbeitung führt bei Geräten mit Ausgangsleistungen von mehreren 100 W und darüber typischerweise im ersten iterativen Schritt zu dem Ergebnis, dass ohne Maßnahmen zur Minderung des Risikos durch Laserstrahlung das verbleibende Restrisiko auf einem nicht akzeptablen Niveau verbleibt; insbesondere trifft dieses für das Auge zu (siehe auch Anhang 3).

Folgt man den normativen Ausführungen der DIN EN ISO 12100-1, so sind die Gefährdungen von Personen durch Laserstrahlung bei HLG primär durch eine inhärent sichere Konstruktion, d. h. durch die Integration konstruktiver Schutzeinrichtungen auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf verwiesen, dass die persönliche Schutzausrüstung, wie z. B. die Laserschutzbrille, nur eine nachrangige Maßnahme ist.

Typische technische Schutzmaßnahmen gegen Laserstrahlung sind Einrichtungen zur Abschwächung, Abschirmung/Isolierung oder Deaktivierung der Laserstrahlung. Sie sind in der DIN EN 60825 Teil 1 und Teil 4 sowie in der DIN EN ISO 11553 Teil 1 und Teil 2 näher erläutert. Unterschieden werden

- passive Komponenten, die allein durch ihre physikalischen Eigenschaften der Laserstrahlung eine gewisse Zeitdauer standhalten und
- aktive Systeme, die Zustände mit Hilfe von Sensoren überwachen und in Verbindung mit einer sicheren Steuerung und Aktuatoren (u. a. Shutter, Schütze) die Laserstrahlung isolieren oder deaktivieren.

Anders als bei automatisierten Lasermaschinen, deren Laserbereich zumeist vollständig eingehaust werden kann, ist eine vollständige Abschirmung bei vielen HLG prinzipbedingt nicht oder nur bedingt (z. B. in Kombination mit dem Werkstück) realisierbar. Somit besteht die Aufgabe, den Bediener und weitere Personen im Arbeitsumfeld durch die Realisierung alternativer aktiver Konzepte wie z. B. partieller Abschirmungen in Verbindung mit sicherer Steuerungstechnik vor gefährlicher Laserstrahlung zu schützen.

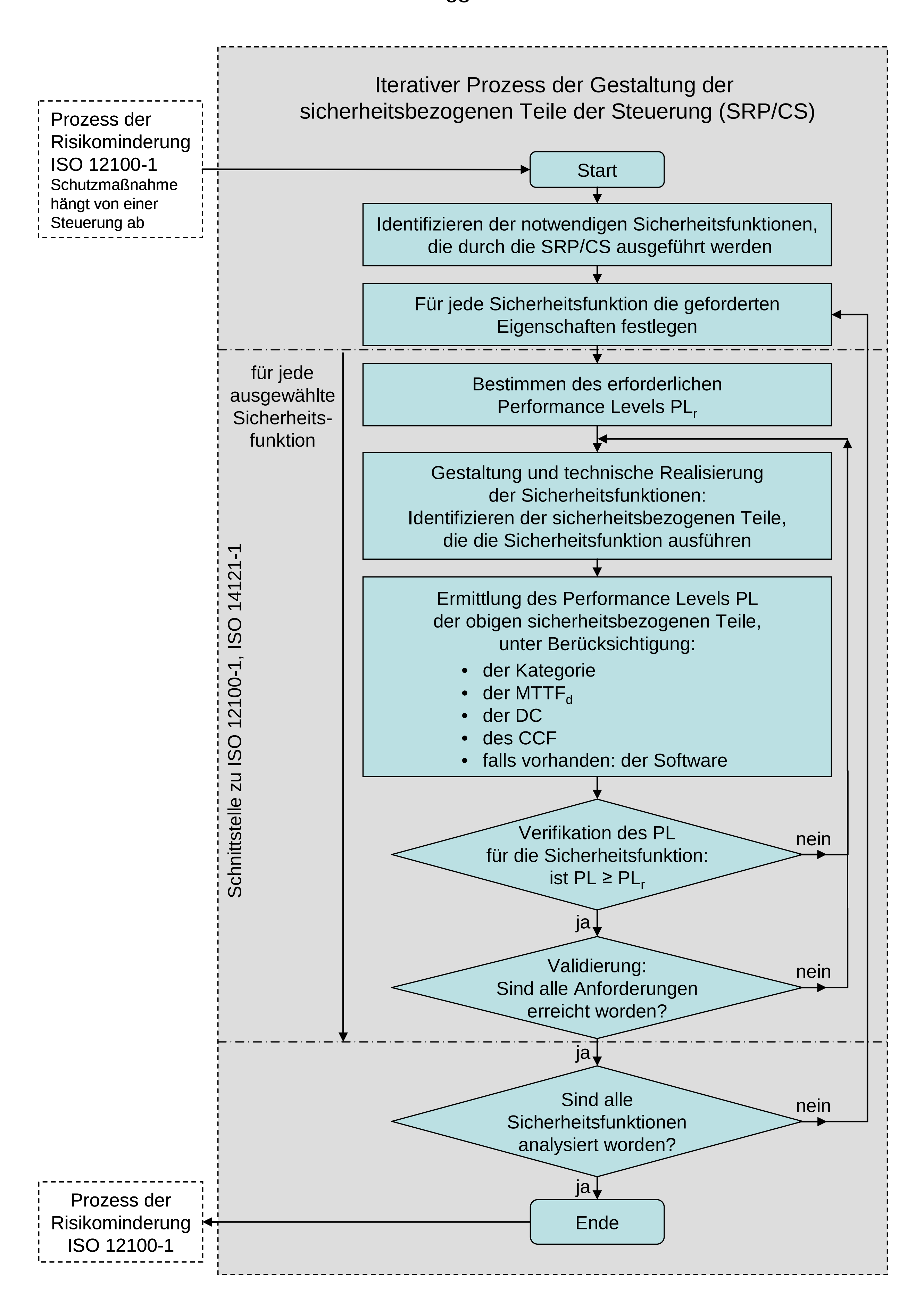


Abb. 4.2 Iterativer Prozess der Gestaltung notwendiger Sicherheitsfunktionen, die durch die sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung ausgeführt werden

Auch muss sichergestellt werden, dass Fehler in der Strahlführung nicht zu einem Versagen (z. B. Bruch) der Strahlführungskomponenten führen, in deren Folge Laserstrahlung in den Arbeitsbereich propagieren kann.
Dieses betrifft bei HLG, die über Lichtleitfaser versorgt werden, die Lichtleitfaser inklusive der Faserstecker.
Aber auch die Strahlführungs- und Strahlformungskomponenten im HLG müssen passiv so ausgelegt oder aktiv überwacht werden, dass in vorhersehbaren Fehlerfällen die HLG-Konstruktion der Laserstrahlung standhält und keine gefährlichen Oberflächentemperaturen am Gehäuse entstehen oder gefährliche Laserstrahlung aus dem HLG-Gehäuse austritt.

Werden aktive Komponenten (SRP/CS) zur Überwachung bestimmter Zustände verwendet, so müssen in einem ersten Schritt die auszuführenden Sicherheitsfunktionen definiert werden.

Eine übergeordnete auszuführende Sicherheitsfunktion bei HLG muss gewährleisten, dass nach der sicheren Erkennung gefahrbringender Situationen/Zustände die Laserstrahlung sicher abgeschwächt bzw. isoliert (z. B. durch Strahlverschluss, Abschirmungen) oder deaktiviert wird (Ausschalten des Laserprozesses). Dieses umfasst bei HLG zumeist folgende spezifische Sicherheitsfunktionen (die in weiteren Normen näher erläutert sind):

- Sicherheitsbezogene Stoppfunktion, eingeleitet durch eine Schutzeinrichtung, DIN EN 60204-1,
- Start-/Wiederanlauffunktion, DIN EN 60204-1,
- Vermeidung des unerwarteten Anlaufs, DIN EN 60204-1, DIN EN 1037,
- Zweihand-Schaltung/Zustimmfunktion, DIN EN 60204-1, DIN EN 574,
- Funktion zum Stillsetzen im Notfall (Not-Halt), DIN EN 60204-1, DIN EN ISO 13850,
- Schwankungen, Verlust und Wiederkehr der Energiequellen, DIN EN 60204-1,
- Sicherheitsbezogene Parameter (Parametrisierung), DIN EN 60204-1, DIN EN 60825-1.

Die einzelnen SRP/CS haben dabei die Aufgabe, Zustände zu erfassen (Sensoren), die Signale zu verarbeiten und zu überwachen (programmierbare sichere Logiksteuerung, PLC), sowie die mechanischen oder elektrischen Bauteile im Lasergerät (Aktuatoren) anzusteuern.

Anders als bei ortsfesten automatisierten Laseranlagen steht der Konstrukteur von HLG bei der Realisierung der konstruktiven Maßnahmen immer auch vor der Aufgabe, die ergonomischen Aspekte wie u. a. Gewicht, Größe und Handhabbarkeit des HLG zu berücksichtigen.

Dieses bedeutet, dass in der Regel nur sehr klein bauende oder miniaturisierte Bauelemente möglichst geringen Gewichts eingesetzt werden können. Hinsichtlich sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen (u. a. Sensoren) sind diese Anforderungen aber nicht immer leicht mit den sicherheitstechnischen Anforderungen, z. B. an die Performance Level oder erforderlichen Steuerungskategorien der SRP/CS zu vereinbaren. Werden SRP/CS mit niedrigen Steuerungskategorien/Performance Level verwendet, besteht die Möglichkeit durch entsprechende Architektur der Sicherheitssteuerung und Signalauswertung, erforderliche Performance Level PL_r für das Gesamtsystem zu erreichen (siehe auch 4.3).

4.2 Sicherheitskonzepte zur Isolierung der Laserstrahlung

Aufgrund der großen Bandbreite von HLG-Anwendungen und der daraus resultierenden Bauartenvielfalt kann es nicht ein „universelles Sicherheitskonzept für HLG“ geben. Das Ergebnis der Maßnahmen zur Risikominderung für ein bestimmtes HLG ist immer eine Berücksichtigung der speziellen Anforderungen und eine Kombination von konstruktiven technischen Elementen beziehungsweise sicherheitsbezogenen Bauteilen.

Trotz dieser Diversität lassen sich aber je nach Bauartprinzip des HLG gleichartige Anforderungen an Sicherheitsfunktionen erkennen, die in übergeordnete Lösungsansätze münden. Diese sind im Folgenden aufgeführt.

4.2.1 Positions-/Aufsatzkontrolle

Bei HLG, die auf Werkstücke aufgesetzt werden, basiert der Lösungsansatz auf der Überwachung der Position des HLG auf dem Werkstück (z. B. Aufsatzkontrolle) durch Sensoren unterschiedlicher Eigenschaften (berührend/nicht-berührend) sowie verschiedener Wirkprinzipien.

Für bestimmte Anwendungen (z. B. Markieren, Überlappschweißen) kann durch Kombination einer Teilabschirmung am HLG mit ebenen spaltfreien Werkstücken, die für die Laserstrahlung nicht transparent sind, eine vollständige Abschirmung der Prozesszone erreicht werden.

In allen anderen Fällen können die Freiheitsgrade, (Winkel über den die Laserstrahlung an einer HLG-Teilabschirmung vorbei in den freien Raum propagiert) sinnvoll eingeschränkt werden; hierdurch lässt sich das Risiko der Laserstrahlungsexposition für Personen im Laserbereich deutlich minimieren.

Bei frei geführten HLG (z. B. Reinigen) kann überwacht werden, ob sich ein zu bearbeitendes Objekt/Werkstück in einem zuvor definierten Abstand vor dem HLG befindet. Einsatz finden hier Sensoren, die nicht-berührend messen und z. B. nach einem optischen oder akustischen (Ultraschall) Wirkprinzip arbeiten. Die Objekt- oder Positionskontrollen ermöglichen eine Risikominderung insbesondere hinsichtlich Expositionen durch den direkten Laserstrahl.

4.2.2 Lagekontrolle

Eine Lagekontrolle stellt sicher, dass das HLG nur in zuvor definierten Lagen (z. B. vertikal, horizontal) betrieben werden kann. Hierdurch wird erreicht, dass die Freiheitsgrade der Strahlaustrittsöffnungslage reduziert werden. Eine Lagekontrolle kann dazu beitragen, bei vorhersehbaren Fehlerbedingungen wie Abrutschen und Abgleiten des HLG oder des Bedieners eine schnelle Laserstrahlisolierung einzuleiten.

4.2.3 Bewegungskontrolle

Diese auf ein- oder mehrachsigen Beschleunigungsaufnehmern oder Gyroskopen basierenden Sensoren dienen dazu, Fehlerbedingungen in der Bedienung des HLG zu detektieren. Sie können wie Lagesensoren auch dazu beitragen, bei Abrutschen und Abgleiten des HLG oder des Bedieners eine schnelle Laserstrahlisolierung einzuleiten.

4.2.4 Freigabekontrolle/Zustimmtaster

HLG werden mit den Händen geführt und/oder positioniert. Um Gefährdungen der Hände durch direkte oder reflektierte Laserstrahlung weitestgehend zu reduzieren, ist es das Ziel, die Position der Hände/Finger beim Betrieb des HLG festzulegen und die Laserstrahlung nur durch eine bewusste Handlung (Zustimmung) freizugeben, um Personen vor unbeabsichtigter Exposition zu schützen. Der Einsatz von Zustimmtastern stellt sicher, dass in vorhersehbaren Fehlerfällen, wie das Abrutschen der Hand vom HLG/Zustimmtaster oder das Fallenlassen des HLG die Isolierung der Laserstrahlung sicher eingeleitet wird.

4.2.5 Strahlführungsüberwachung

Die Strahlführungsüberwachung stellt sicher, dass in vorhersehbaren Fehlerfällen die Laserstrahlung nicht zu kritischen Bauteil- bzw. Oberflächentemperaturen des HLG-Gehäuses führt und/oder es nicht zum Austritt von gefährlicher Laserstrahlung in Folge von Versagen der Abschirmungen (unbeabsichtigte Trennung von Schnittstellen, Bruch, thermische Zerstörung) kommt.

Die Strahlführungsüberwachung beinhaltet typischerweise die Überwachung folgender Komponenten

- Faserstecker (Lasergeräteseitig, HLG-seitig)
- Lichtleitfaser
- Strahlführungs- und Strahlformungskomponenten im HLG

Detektiert werden Fehler in der Positionierung von Komponenten (z. B. mittels mechanischer SIPO oder elektrischen Kontakten) sowie der Bruch der Lichtleitfaser (z. B. mit Hilfe der Zerstörung von elektrischen Leitern in der Faserhülle). Fehler aufgrund einer Dejustage des Laserstrahls oder Fehler an optischen Komponenten können indirekt mit Hilfe von Temperatursensoren an Abschirmungskomponenten oder Detektoren für gestreute Strahlung gemessen werden. Eine Kontrolle eines möglichen Leistungsverlustes über die gesamte Strecke der Strahlführung ermöglichen Monitordioden nahe der letzten optischen Komponente im HLG.

In allen genanten Fällen können die Sensoren in Verbindung mit Grenzwertschaltern und einer Sicherheitssteuerung bei Überschreitung zuvor festgelegter Grenzen die Einleitung einer sicheren Isolierung der Laserstrahlung ermöglichen.

4.3 Gestaltung sicherer Steuerungen

Die Anforderungen an die Architektur der Steuerung von HLG ergeben sich aus der Risikoanalyse gemäß DIN EN ISO 14121-1 und DIN EN ISO 13849-1.

Grundsätzlich kann die Architektur beziehungsweise die logische Struktur der Steuerung mit Hilfe eines sicherheitsbezogenen Blockdiagramms (gemäß DIN EN ISO 13849-1) dargestellt werden.

Hierbei findet eine block- und kanalbezogene Betrachtung des Verhaltens der SRP/CS statt. Dieses bedeutet, dass

- der Ausfall eines Blocks in einer Serienschaltung von Blöcken zu einem Ausfall des gesamten Kanals führt,

- nur der gefährliche Ausfall aller Kanäle in einer Parallelschaltung zum Verlust der Sicherheitsfunktion führt, und
- Blöcke, die nur für Testzwecke verwendet werden und die Sicherheitsfunktionen in den verschiedenen Kanälen nicht beeinflussen, von Blöcken in den verschiedenen Kanälen getrennt werden können.

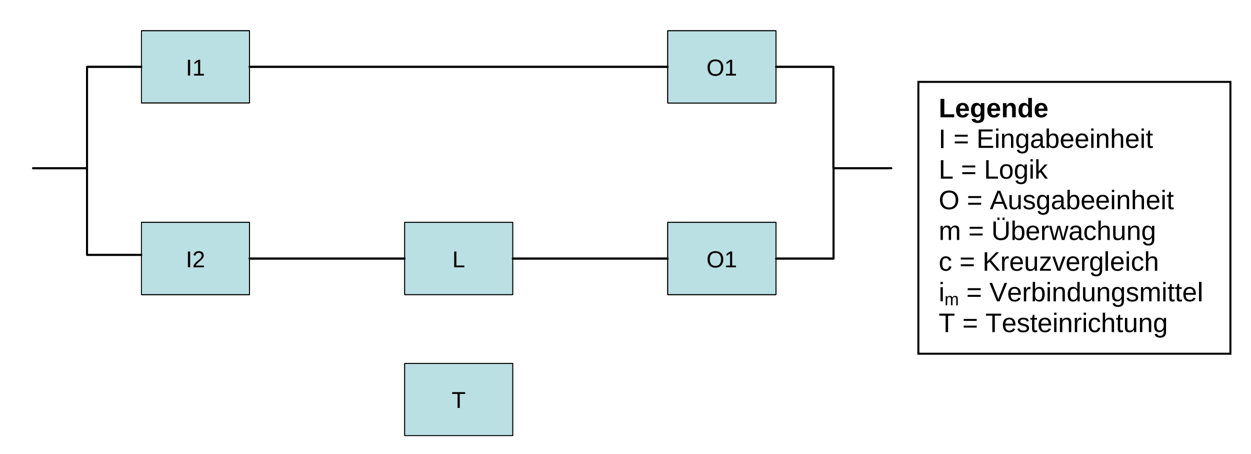


Abb. 4.3 Beispiel eines sicherheitsbezogenen Blockdiagramms

Unter Berücksichtigung der aus der Risikoanalyse resultierenden PL_r von zumeist (d) und (e) (DIN EN 954-1: Kat. 3 sowie Kat. 4) werden im Folgenden konkrete Beispiele für die Architektur der Steuerung von HLG angegeben.

Kategorie 3

Gemäß DIN EN ISO 13849-1 müssen sicherheitsbezogene Teile einer Steuerung (SRP/CS) der Kategorie 3 derart gestaltet werden, dass ein einzelner Fehler in einem dieser Teile nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion führt. Wenn immer in angemessener Weise durchführbar, muss ein einzelner Fehler bei oder vor der nächsten Anforderung der Sicherheitsfunktion erkannt werden.

Das Systemverhalten der Kategorie 3 lässt zu, dass

- bei Auftreten eines einzelnen Fehlers die Sicherheitsfunktion immer ausgeführt wird
- einige, aber nicht alle Fehler erkannt werden,
- die Anhäufung unerkannter Fehler zum Verlust der Sicherheitsfunktion führen kann.

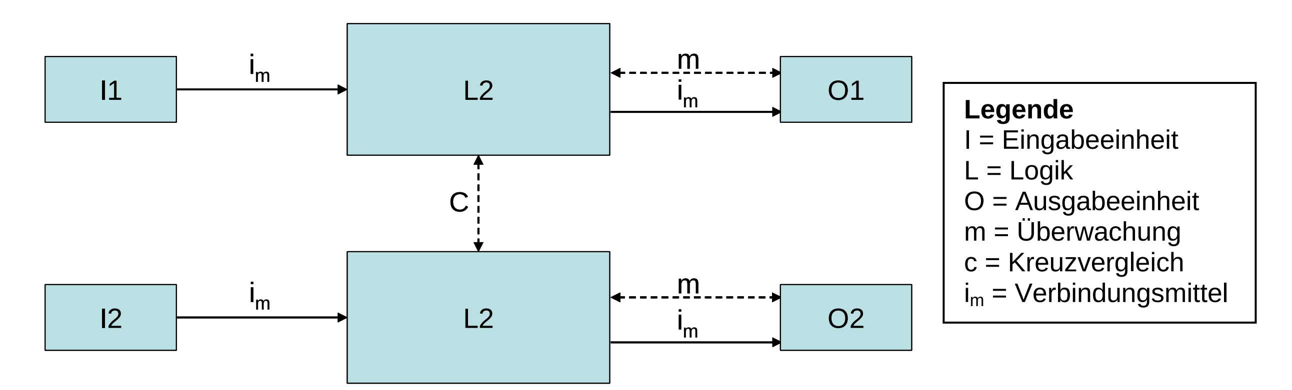


Abb. 4.4 Vorgesehene Architektur für Kategorie 3

Kategorie 4

Gemäß DIN EN ISO 13849-1 müssen sicherheitsbezogene Teile einer Steuerung (SRP/CS) der Kategorie 4 derart gestaltet werden, dass ein einzelner Fehler in jedem dieser sicherheitsbezogenen Teile nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktionen führt und der einzelne Fehler bei oder vor der nächsten Anforderung der Sicherheitsfunktion erkannt wird. Zum Beispiel unmittelbar, beim Einschalten oder am Ende eines Maschinenzyklus. Wenn diese Erkennung nicht möglich ist, dann darf die Anhäufung von Fehlern nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion führen.

Das Systemverhalten der Kategorie 4 lässt zu, dass

- bei Auftreten eines einzelnen Fehlers die Sicherheitsfunktion immer ausgeführt wird,
- Fehler rechtzeitig erkannt werden, um den Verlust der Sicherheitsfunktion zu verhindern,
- Anhäufungen unerkannter Fehler in Betracht gezogen werden.

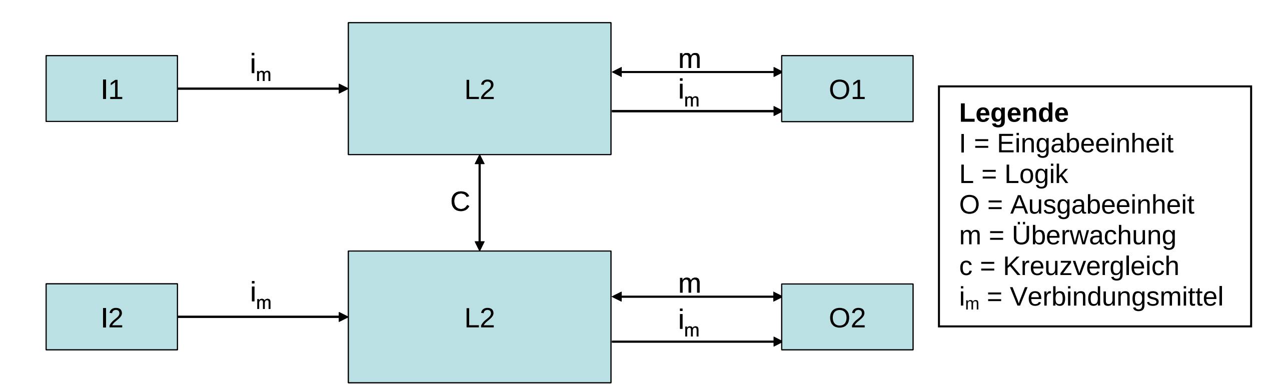


Abb. 4.5 Vorgesehene Architektur für Kategorie 4

HLG und Anforderungen an die Architektur sicherer Steuerungen

Der Konstrukteur von HLG sieht sich mit Bezug zu SRP/CS einem sehr konträren Anforderungsprofil ausgesetzt (siehe auch Abschnitt 4.1). Die Anforderungen resultieren

- zum einen aus dem erforderlichen Performance Level (PL_r) bzw. der Steuerungskategorie, den die SRP/CS erfüllen müssen (siehe Abschnitt 3.3),
- zum anderen setzt das erforderliche ergonomische Design eines HLG knappe Grenzen bezüglich des Gewichtes, der Baugröße sowie der Gestaltungsfreiheit.

Derzeitig am Markt verfügbare Eingabeeinheiten (Sensoren), Logiken und Ausgabeeinheiten, die jede für sich genommen PL von (d) oder (e) (Kat 3 oder Kat 4) erfüllen, weisen häufig große Abmessungen (Baugröße) und ein hohes Gewicht auf, so dass sie nicht oder nur sehr bedingt für eine Integration in ein HLG geeignet sind.

Im Bereich der Mikroelektronik findet sich jedoch eine Vielzahl von (insbesondere) Eingabeeinheiten bzw. Sensoren, die akzeptable Abmessungen bei vertretbarem Gewicht aufweisen, jedoch nur Steuerungskategorien < Kat. 3, d. h. Kat. B, Kat. 1, oder Kat. 2 erreichen.

Ebenfalls findet sich am Markt eine Reihe von Herstellern, die sichere SPS (zertifiziert) anbieten. Die Steuerungen erreichen typischerweise Steuerungskategorien von Kat. 4 oder PL=e.

Diese sicherheitsgerichteten Kleinsteuerungen (Sicherheits-Kleinsteuerungen) ver-

fügen typischerweise über eine bestimmte Anzahl sicherer (d. h. überwachter) Eingänge und auch Ausgänge. Bei den meisten Steuerungen sind die Eingänge als Digitaleingänge ausgelegt, einige Steuerungen gestatten aber auch die Verarbeitung analoger Signale. Die Logiksteuerungen in Verbindung mit der entsprechenden Software ermöglichen zumeist eine einfache Konfiguration der Eingänge, der Verarbeitung der Signale sowie der Ausgänge. Darüber hinaus sind sie auch in der Lage, die Spannungsversorgung (auf Überspannung oder Unterspannung) intern zu überprüfen.

Ein möglicher Ansatz bezüglich HLG ist die Verknüpfung von Eingabeeinheiten mit einer entsprechenden nachgeschalteten Signalaufbereitung/-verarbeitung, einer programmierbaren Logik sowie Ausgabeeinheit(en) zu einer sicheren Steuerung. Zur Gewährleistung entsprechender Schutzlevel werden an die Architektur der Steuerung allerdings bestimmte Anforderungen gestellt.

Voraussetzungen sind:

- eine redundante, d. h. parallele Architektur (≥ 2-kanalig) von der Eingabeeinheit über Signalaufbereitungs-/Signalverarbeitungseinheiten bis zum sicheren Eingang der Logikeinheit
  → so dass ein einzelner Fehler nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion führt. Die Redundanz kann durch gleichartige Eingabeeinheiten (homogene Redundanz) oder durch Eingabeeinheiten verschiedener Wirkprinzipen (diversitäre Redundanz) erzielt werden. Diversitärer Redundanz ist mit Bezug zur erreichbaren Sicherheit der Vorzug zu geben.
- eine Überwachung der Signale vor der nächsten Anforderung der Sicherheitsfunktion (z. B. durch sequenzielle Überwachung: d. h. Signale müssen in einem bestimmten zeitlichen Abstand auflaufen, Plausibilität verknüpfter Signale, beispielhaft analoge Signale: sie müssen bestimmte Kriterien (Amplitude) erfüllen)

  → so dass ein einzelner Fehler erkannt wird.

In Abb. 4.6 ist eine mögliche Architektur für Steuerungen von HLG dargestellt.

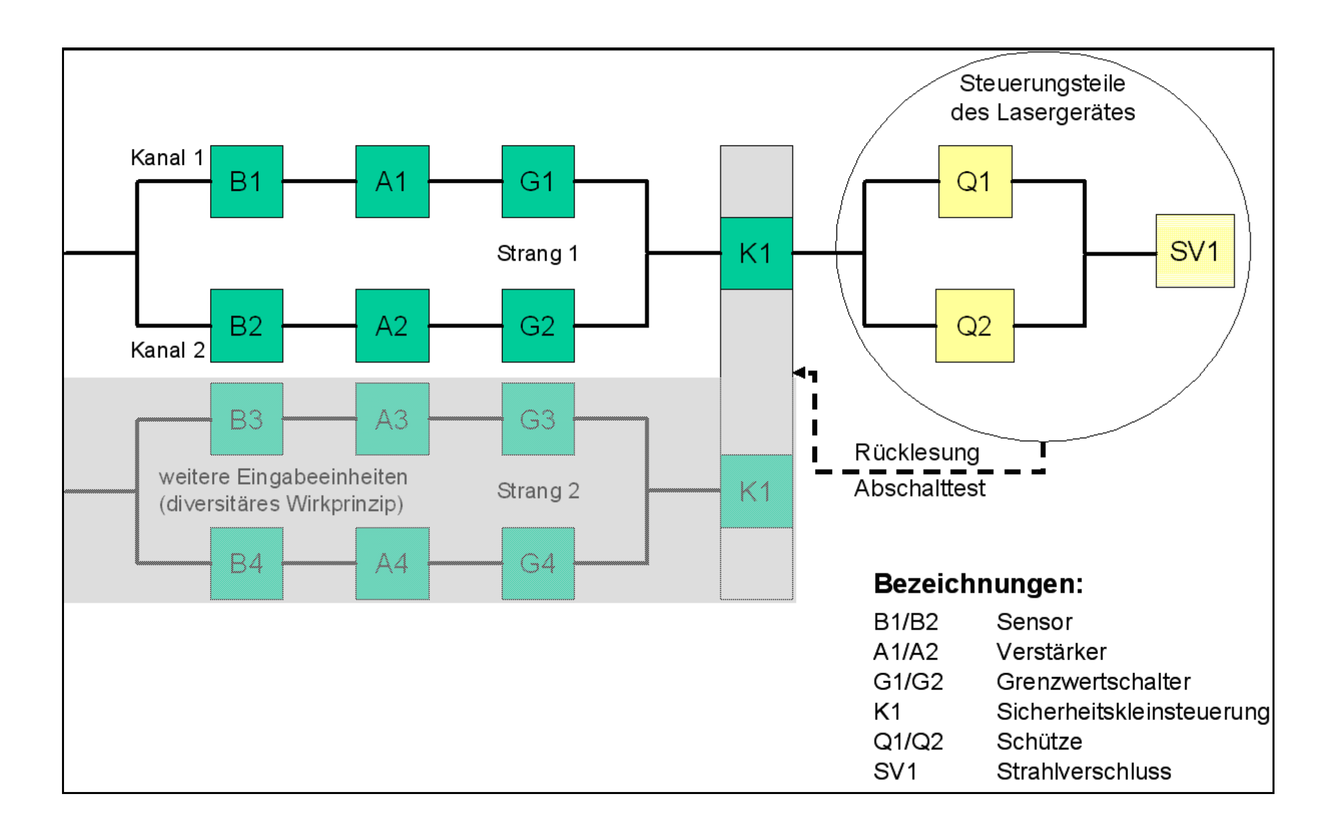


Abb. 4.6 Beispiel eines Blockdiagramms für eine sicherheitsbezogene Stoppfunktion

Die Schaltung (SRP/CS) lässt sich in drei Subsysteme (wie im Blockdiagramm dargestellt) aufteilen:

- Sensor(en) oder Eingabe-/Befehlsgeräte (NOT-HALT) sowie nachgeschaltete Signalverarbeitungselemente — B, A, G
- Sichere SPS — K
- Aktuator(en) — Q, SV

5 Ausgewählte und qualifizierte sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen

Auf Basis der Recherche des Status-Quo (Abschnitt 2) und der Anforderungen aus den Abschnitten 3 und 4 an sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen, deren Architektur sowie Sicherheitsfunktionen wurden ausgewählte am Markt verfügbare Produkte einer Qualifizierung unterzogen (vgl. dazu auch Anhang 5).

Zur Aufnahme der Bedienelemente (Zustimmtaster) und der Sensoren wurde ein Funktionsträger erstellt, mit dem Anwendungen und die Handhabung von HLG nachgestellt werden können. Weitere Bauelemente, die aufgrund ihrer Baugröße und des Gewichts aus ergonomischen Aspekten nicht in das HLG integriert werden können, wie Signalauswerteeinheiten, Sicherheitssteuerung (PLC) und Aktuatoren, werden in einer mobilen Steuerbox platziert und über Signalleitungen mit dem HLG bzw. den Sensoren und der Steuerung des Lasergerätes verbunden.

Im Folgenden sind der Versuchsträger sowie die zur Qualifizierung ausgewählten SRP/CS beschrieben.

5.1 Funktionsträger

Für die Erprobung und Bewertung der Funktionalität von sicherheitsbezogenen Teilen der HLG-Steuerungen ist ein Versuchsträger auf Basis bereits existierender Versuchs-HLG erstellt worden.

Ansatzpunkte bei der Auslegung des Versuchsträgers sind:

- einfache modulare Bauweise
- kostengünstig (da mehrere gleichartige Versuchsträger gebaut werden)
- Baugröße (Abmaße) entspricht derjenigen von marktverfügbaren HLG
- einfache Adaption/Integration von Sensoren/Sensorsystemen an Versuchsträger
- Verknüpfung mit Steuerungssystemen

Der bestückte Versuchsträger (ohne Komponenten für Strahlführungskontrolle) ist in Abb. 5.1 dargestellt.



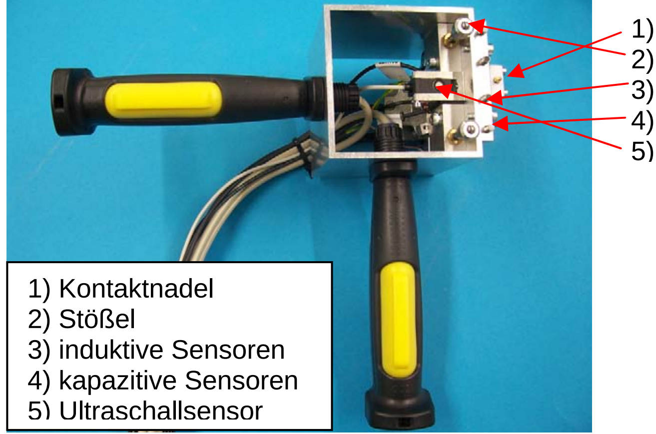


Abb. 5.1 Versuchsträgermodul

Tab. 5.1 Auflistung von Sensoren/Sensorsystemen bzw. sicherheitsbezogenen Teilen von Steuerungen (ausgewählte und qualifizierte Sensoren: rot markiert)

Gruppe/ Art des Bauteils	**Wirkprinzip**	**Architektur (Kanäle/Logik)**	**Erreichbare Kategorie bzw. PL**	**erforderlicher PL_r** (gemäß Risikograph)
1) berührende Aufsatzkontrollen				
Nadel 2 Nadeln	elektrisch/ modulierter Strom - Werkstück/Nadel - Nadel/Nadel	1 kanal, 2 kanal; - mit Logik Fehlererkennung möglich	Kat.3/Kat.4 PL: d	d
federbelasteter Stift, 2 oder mehr Stifte	mechanisch/ elektrisch (Taster) - Sequenzkontrolle - rel. umgebungsneutral	bewährte Feder, 2 kanal; - homogen redundant; - mit Logik Fehlererkennung möglich	Kat.3/Kat.4 PL: c; d	d (e_{Auge}) Aufsatzgerät
federbelasteter Stift, 2 oder mehr Stifte	mechanisch/elektr. (induktiv/kapazitiv) z. T. Einfluss von Störgrößen (kap. Sensor)	bewährte Feder, 2 kanal; - homogen redundant - mit Logik Fehlererkennung möglich - diversitär redundant: Positionsmessung mit unterschiedlichem Wirkprinzip	Kat.3/Kat.4 PL: c; d	d (e_{Auge}) Aufsatzgerät
2) berührungslose Abstandskontrollen				
Induktiver Sensor	induktiv/elektrisch	1 kanal: bewährt 2 kanal: - homogen redundant - mit Logik Fehlererkennung möglich	Kat.1-4 PL: a-d	d (HLG System offen) (e_{Auge}) Aufsatzgerät
Induktiver Sensor sicherheitsgerichtet	induktiv/elektrisch	2 kanal - mit Auswerteeinheit (Logik) Fehlererkennung	Kat 4 PL: d/e	d (HLG System offen) (e_{Auge}) Aufsatzgerät
Triangulation PSD	optisch/elektrisch	1 kanal: bewährt 2 kanal: - homogen redundant - wenn modulierbar: mit Logik Fehlererkennung möglich	Kat.1-4 PL: a-d	Haut a-c (nach Ausgangsleistung, HLG System offen)
Triangulation CCD/CMOS (Pixel-bezogen)	optisch/elektrisch	1 kanal: bewährt 2 kanal: - homogen redundant	Kat.1-3 PL: a-c	Haut a-c (nach Ausgangsleistung, HLG System offen)
Distanzsensor (eindimensional; Laser)	optisch/elektrisch	1 kanal: bewährt 2 kanal: - homogen redundant - wenn modulierbar: mit Logik Fehlererkennung möglich	Kat.1-4 PL: a-d	Haut a-c (nach Ausgangsleistung, HLG System offen)
Ultraschall	akustisch	1 kanal: bewährt 2 kanal: - homogen redundant	Kat.1-3 PL: a-c	Haut a-c (nach Ausgangsleistung, HLG System offen)

Gruppe/ Art des Bauteils	Wirkprinzip	Architektur (Kanäle/Logik)	Erreichbare Kategorie bzw. PL	erforderlicher PL_r (gemäß Risikograph)
3) Sensoren für die Strahlführung				
Streulichtsensor	optisch - Signalabgleich	1 kanal: - bei Fehler in sicheren Zustand 2 kanal: - homogen redundant - mit Logik Fehler-erkennung möglich	Kat.1 bis Kat.3 PL: a-c	a (ohne Strahlaus-tritt)
Temperatursensor	elektrisch/ PT100: Wider-stand -Signalabgleich - Konstantstrom-überwachung	1 kanal: - bei Fehler in sicheren Zustand 2 kanal: - homogen redundant - mit Logik Fehler-erkennung möglich	Kat.1 bis Kat.3 PL: a-c	a (ohne Strahlaus-tritt)
Temperatursensor	elektrisch/ Tempe-raturschalter -Signalabgleich	1 kanal: - bei Fehler in sicheren Zustand 2 kanal: - homogen redundant	Kat.1 bis Kat.3 PL: a-c	a (ohne Strahlaus-tritt)
4) weitere Sensoren				
Fremd-/Umgebungs-lichtsensor	optisch/elektrisch	1 kanal: - bei Fehler in sicheren Zustand 2 kanal: - homogen redundant - mit Logik Fehler-erkennung möglich	Kat.1 bis Kat.3 PL: a-c	a (ohne Strahl-austritt) d/e (Auge) (mit Strahlaus-tritt)
Mikrodrucksensor	pneumatisch/ elektrisch	1 kanal: - bei Fehler in sicheren Zustand 2 kanal: - homogen redundant - mit Logik Fehler-erkennung möglich	Kat.1 bis Kat.3 PL: a-c	a (ohne Strahl-austritt) d/e (Auge) (mit Strahlaus-tritt)
Lage-, Neigungs-sensoren	thermodynamisch/ elektronisch	1 kanal: - bei Fehler in sicheren Zustand 2 kanal: - homogen redundant - mit Logik Fehler-erkennung möglich	Kat.1 bis Kat.3 PL: a-c	je nach Strahl-propagation (Haut/Auge) PL: b-e
5) Bedienelemente				
Fußtaster (sicherheitsgerichteter zwangsgeführter Zustimm-Fußtaster)	mechanisch/ elekt-risch	2 kanal - mit Logik Fehler-erkennung	Kat.3/Kat.4 PL: d; (e)	d, e (Auge)
Handtaster (sicherheitsgerichtete Zweihandschaltung; DIN EN 574)	mechanisch/ elekt-risch	2 kanal - mit Logik Fehler-erkennung	Kat.4 PL: d; (e)	d, e (Auge)

Gruppe/ Art des Bauteils	Wirkprinzip	Architektur (Kanäle/Logik)	Erreichbare Kategorie bzw. PL	erforderlicher PL_r (gemäß Risikograph)
6) Steuerungen-/Steuerungssysteme				
Hardware-Relais	elektrisch/ elektronisch	2 kanal	Kat.3/Kat.4 PL: d; (e)	d, e (Auge)
Klein-SPS (mindestens 2)	elektronisch	2 kanal homogen redundant - mit selbsterstellter Logik und Software: Fehlererkennung möglich	Kat.3/Kat.4 PL: d; (e)	d, e (Auge)
Sichere Klein-SPS	elektronisch	2 kanal - sicherheitsgerichtete Logiksteuerung inkl. Software (DIN EN 62061 / 61508)	Kat.3/Kat.4 PL: d; (e) SILCL 3; SIL 3	d, e (Auge)

In der obigen Matrix (Tab. 5.1) sind Sensoren/Sensorsysteme bzw. sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen aufgelistet, die auf ihre Funktionalität bewertet werden. Angegeben ist ihr Wirkprinzip, die Architektur der Steuerung sowie erreichbare Steuerungskategorien/Performance Level.

5.1.1 Sensoren

Im Folgenden sind die Typbezeichnungen der Sensoren, die in den Funktionsträger installiert (z. T. alternativ) und einer Qualifizierung unterzogen wurden, aufgelistet:

Auflagekontrolle, berührend

Balluff	Induktiver Sensor, BES 516-3006-G-E4-C-PU-02 / NPN (für Stößel)
Knitterswitch	Druckschalter(Taster) ON-IMP 2 Pol, MPA 206R (für Stößel)
Bosch Rexroth	Federstößel, Serie PSL, PSL-M3-5
Rodriguez	Mini-Kugelrollen, 11MI-05-15, 11MI-06-17 (für Stößel)
LZH-Eigenbau	Kontaktnadel mit moduliertem Stromfluss

Auflagekontrolle, berührungslos

Balluff	Induktiver Sensor, BES 516-3005-G-E4-C-PU-02 / PNP
Balluff	Kapazitiver Sensor, SK-1-M5-B-VA/PTFE mit Signalverstärker, SV-45/30/15-PS
Balluff	Induktiver Sensor BES M08MG1-NOC60F-S49G
Balluff	Induktiver Sensor BES M08EG-PSC15A-S49G-W
Baumer	Ultraschallsensor, UNDK 10P8914

Lage-/Beschleunigungskontrolle, berührungslos

Disynet	MEMS kapazitiver Beschleunigungsaufnehmer, DA 3102-002g
HY-Line	MEMS Lagesensor, SCA 121T-D03 und D05
TOPAS	Zweiachsiges Gyroskop mit Evaluation–Board, IDG-300EVB

Temperaturkontrolle/Strahlführung

Jumo	Platin-Chip-Temperatursensor, Typ PCA 1.2010.1S
Minco	Thermocouple, NiCr-N, Typ K, TC 40
Panasonic	Temperatur-Controller KT7

<u>Zustimmschalter</u>

EAO/IDEC	Zustimmungsschalter HE1G-21SM

<u>Sicherheits-Kleinsteuerung</u>

ELAN	sichere Kleinsteuerung, Protect PSC-MON mit PSC-Power mit Protect PSC-S-IN-LC
PILZ	Sichere Kleinsteuerung, PILZ PSS 3047-3.

<u>Sicherheitsrelais (Beispiel für lasergeräteseitige Aktuatoren)</u>

Siemens	Sicherheitsrelais, SR2M- neutral, monostabil mit 2 zwangsgeführten Kontakten

5.1.2 Grenzwertschalter, Fensterdiskriminatoren

Additiv zu den oben genannten Bauteilen werden elektronische Schaltungen für die Signalverarbeitung und -aufbereitung erstellt, um die Signale an die digitalen Eingänge der sicheren SPS leiten zu können.

Verstärker mit veränderbarem Nullpunkt und veränderbarer Signalspreizung werden Sensoren mit analogem Signalausgang nachgeschaltet.

Zur Umwandlung der Analogsignale in digitale Ja-/Nein-Informationen wird jedem Sensorkanal ein Fensterdiskriminator (Grenzwertschalter – obere/untere Schwelle) nachgeschaltet. Die Fensterdiskriminatoren verfügen über einen Halbleiterausgang, der digitale Ja-/Nein-Informationen an die Digitaleingänge der sicheren SPS leitet. Eine Schwelle der Fensterdiskriminatoren wird indirekt durch die Anpassung des Analogsignals der Sensoren festgelegt (feste Schwelle), die andere Schwelle wird mit Hilfe von manuell einstellbaren Potentiometern eingestellt.

Hierdurch kann eine Anpassung der Grenzwertschalter an die Ausgangssignale der jeweiligen Sensoren erfolgen (Schwellwerteinstellung).

Im späteren Einsatz von HLG kann auf der Basis der Untersuchungsergebnisse eine feste Einstellung (z. B. mittels Festwiderständen) vorteilhaft vorgenommen werden.

5.1.3 Zustimmungstaster

Verwendet werden zwei orthogonal am HLG-Funktionsträger montierte Zustimmungstaster der Firma EAO, Typ HE 1G-21SM. Der Zustimmungstaster ist 3-stufig ausgeführt (AUS-EIN-AUS). Aus ergonomischen und sicherheitstechnischen Aspekten gewährleistet nur ein 3-stufiger Schalter die Abschaltung sowohl beim Loslassen als auch beim festen Durchdrücken in Schrecksituationen. Der Taster stellt ebenfalls sicher, dass die Kontakte bei der Rückstellung von Stufe 3 nach 1 in der Stufe 2 nicht geschlossen werden, damit keine kurzzeitige Aktivierung der Maschine erfolgt.

5.2 Sicherheitssteuerung

Für die Untersuchungen standen zwei sichere Steuerungen verschiedener Hersteller zur Verfügung.

- Sicherheits-Kleinsteuerung von ELAN, Typ Protect-PSC-CPU-MON,
- Kompakte Sicherheitssteuerung von PILZ, Typ PSS 3047-3.

Die Sicherheits-Kleinsteuerung PSC-CPU-MON erlaubt die Programmierung logischer Verknüpfungen (und/oder) und anderer logischen Funktionen/Operationen in einer Programmiersprache (KOP) gemäß IEC 61131. Die Sicherheits-Kleinsteuerung ist modular aufgebaut. Sie stellt 4 sichere digitale Eingänge (Zweikanal, Kat. 4) oder 8 unsichere digitale Eingänge (Einkanal, Kat. 2) und 3 sichere Ausgänge (Zweikanal, Kat. 4) oder 6 unsichere Ausgänge (Einkanal, Kat. 2) zur Verfügung. Die Kleinsteuerung kann ohne großen hardware- und software- bzw. programmiertechnischen Aufwand mit weiteren Eingängen und Ausgängen erweitert werden.

Die Mehrzahl der Untersuchungen erfolgte an dieser Kleinsteuerung, da sie aufgrund ausreichender Anzahl von Ein- und Ausgängen sowie ihres Kostenvorteils für den Einsatz bei HLG prädestiniert ist.

Bei der kompakten Sicherheitssteuerung PILZ PSS 3047-3 handelt es sich um eine komplexere Steuerung. Sie verfügt über 32 digitale Eingänge, von denen 6 (Zweikanal) als sichere Eingänge ausgelegt sind. Daneben bietet die Steuerung 6 analoge Eingänge. Sie ist mit 12 Ausgängen (Einkanal) ausgestattet von denen 4 als Rückmeldekanal konfiguriert werden können. 3 Ausgänge können als zweikanalige Ausgänge genutzt werden. Die Steuerung wird mit Hilfe einer programmierbaren ausfallsicheren Logiksteuerung überwacht.

5.2.1 Architektur der Steuerung von HLG

Generell wird bei dem Funktionsmuster von folgenden alternativen Architekturen der Steuerungen ausgegangen:

1) Aufgrund der geforderten miniaturisierten Baugröße werden überwiegend nicht sicherheitsgerichtete homogen oder diversitär redundante Sensorsysteme eingesetzt. Die Systeme werden mit einer sicheren Logiksteuerung (sicherheitsgerichtete Kleinsteuerung) z. B. zum Signalvergleich oder Signalabfolgevergleich (Sequenz) verknüpft. Vorteile dieser „bewährten“ Sensorsysteme im Vergleich zu Systemen höher Steuerungskategorien (≥ Kat. 3) sind die zumeist deutlich kleineren Bauteilabmessungen und das niedrigere Gewicht, die sie für einen Einsatz in HLG prädestinieren.
2) Verwendung sicherheitsgerichteter Sensorsysteme (≥ Kat. 3) wenn ergonomisch möglich und Einbindung in eine sichere Kleinsteuerung.

Die realisierte Architektur erfüllt die in Abschnitt 4 beschriebenen Anforderungen und folgt den entsprechenden Lösungsansätzen. Details zu der Architektur können auch den folgenden Unterabschnitten entnommen werden.

5.2.2 Funktionale Aspekte

Die sichere Steuerung wurde so aufgebaut und konfiguriert, dass die in Abschnitt 4 beschrieben übergeordneten Sicherheitsfunktionen ausgeführt werden können.

Im Folgenden werden detaillierte Informationen zur Realisierung der jeweiligen übergeordneten Sicherheitsfunktion, die von der HLG-Steuerung ausgeführt werden soll, gegeben.

1. Sicherheitsbezogene Stoppfunktion, eingeleitet durch eine Schutzeinrichtung; IEC 60204-1,
2. Start-/Wiederanlauffunktion, IEC 60204-1,
3. Vermeidung des unerwarteten Anlaufs, IEC 60204-1, DIN EN 1037
4. Zustimmfunktion (Zweihandsicherheitsschaltung), IEC 60204-1, DIN EN 574
5. Funktion zum Stillsetzen im Notfall (Not-Halt), IEC 60204-1, DIN EN ISO 13850
6. Schwankungen, Verlust und Wiederkehr der Energiequellen, IEC 60204-1
7. Sicherheitsbezogene Parameter (Parametrisierung)

5.2.2.1 Sicherheitsbezogene Stopp-Funktion, eingeleitet durch eine Schutzeinrichtung

Unterschieden werden gemäß DIN EN 60204-1 folgende Stopp-Kategorien:

- Stopp-Kategorie 0: Stillsetzen durch sofortiges Unterbrechen der Energiezufuhr zu den Maschinen-Antriebselementen (d. h. ein ungesteuertes Stillsetzen);
- Stopp-Kategorie 1: ein gesteuertes Stillsetzen, wobei die Energiezufuhr zu den Maschinen-Antriebselementen beibehalten wird, um das Stillsetzen zu erzielen. Die Energiezufuhr wird erst dann unterbrochen, wenn der Stillstand erreicht ist;
- Stopp-Kategorie 2: ein gesteuertes Stillsetzen, bei dem die Energiezufuhr zu den Maschinen-Antriebselementen beibehalten wird.

Auf der Basis der Gefährdungsanalyse und der Risikobeurteilung muss die entsprechende Stopp-Kategorie festgelegt werden.

HLG und sicherheitsbezogene Stopp-Funktion

In Bezug auf die Isolierung des Laserstrahls ist die HLG-Steuerung derart zu konfigurieren, dass folgende sicherheitsbezogene Stopp-Funktionen ausgeführt werden können:

1. HALT-Zustände (Isolation der Laserstrahlung und ggf. weitere), die aufgrund eines Sensorsignals (z. B. zeitweiliges Abheben des HLG vom Werkstück) erreicht werden und aus typischen Vorgängen während der Bearbeitung (des bestimmungsgemäßen Betriebs) resultieren;
2. HALT-Zustände (Isolation der Laserstrahlung), die aufgrund eines Sensorsignals (z. B. Temperatursensor detektiert zu hohe Temperatur im Strahlengang aufgrund von Störungen in der Strahlführung) erreicht werden und aus einer Störung mit erhöhtem Sicherheitsrisiko resultieren;
   sowie NOT-HALT-Zustände, die nach Erkennen einer gefahrbringenden Situation durch den Bediener durch manuelles Betätigen eines NOT-HALT-Befehlsgerätes eingeleitet werden.

In Verbindung mit erhöhter elektrischer Gefährdung (z. B. bei HLG-Anwendung in engen Räumen oder Außenanwendungen) sollte auch folgende Stopp-Funktion realisiert werden:

3. NOT-HALT (oder NOT-AUS)-Zustände, die aufgrund einer Störung mit erhöhtem Sicherheitsrisiko für elektrischen Schlag – oder anderes Risiko elektrischen Ursprungs – eine vollständige Energietrennung (Strom; sowie ggf. weitere Medien wie z. B. Gase, Kühlwasser; Laserstrahlung) erfordern. Die NOT-AUS-Funktion wird durch manuelles Betätigen eines NOT-AUS-Befehlsgerätes eingeleitet.

Die Halt-Zustände 1 und 2 kann man sinnvollerweise auch als Laser-Stopp bezeichnen.

Sicherheitsbezogene Stopp-Funktionen (Funktionsbeschreibung)

Die einzelnen Funktionen der Sicherheitssteuerung können (gem. 13849-1) wie folgt beschrieben werden:

- Die Objekterkennung/Abstandsmessung erfolgt durch zwei Sensoren B1/B2;
  - bei potenzialfreien Kontakten in Öffner-Schließer-Kombination;
  - bei Halbleiterausgängen gibt es keine Öffner-Schließer-Kombination, hier kann die Logikfunktion durch einen invertierten Ausgang nachgebildet werden (A: bei Objekterkennung ist Ausgangstransistor durchgeschaltet während bei B: bei Objekterkennung der Ausgangstransistor gesperrt ist); dieses ist von der Sicherheits-Kleinsteuerung aber keine zwingende Anforderung (siehe z. B. elan Protect Handbuch)
- Die Signale der Sensoren werden bei Bedarf (je nach Sensortyp und Ausgangssignal) durch Messsignalverstärker A1/A2 verstärkt.
- Analoge Signale werden mit Hilfe von Grenzwertschaltern/Fensterdiskriminatoren G1/G2 bewertet und in digitale Signale gewandelt.
- Die Signale werden von einer zentralen Sicherheits-Kleinsteuerung (Logikeinheit) K1 ausgewertet.
- Die Sicherheits-Kleinsteuerung K1 steuert zwei Schütze Q1 und Q2 an, durch deren Abfall die gefahrbringende Laserstrahlung isoliert wird (z. B. durch sicheren Strahlverschluss – SV – oder Trennung der Versorgungsspannung zu den Pumpmedien).
- Die Sensoren bzw. die Signale werden zur Fehlererkennung in K1 auf Plausibilität und Gleichzeitigkeit überwacht.
- Fehler in Q1 und Q2 werden durch eine Anlaufstellung in K1 erkannt. Ein Start-Befehl ist nur erfolgreich, wenn Q1 und Q2 vorher abgefallen waren.
- Die Sicherheitsfunktion ist auch erfüllt, wenn ein Bauteilausfall auftritt. Fehler werden während des Betriebes oder beim Betätigen (Objekterkennung positiv/ negativ bzw. Öffnen und Schließen) der Sensoren erkannt, was zum Abfall von Q1, Q2 und Betriebshemmung (Laserstrahlisolierung) führt.
- Eine Fehlerhäufung von mehr als zwei Fehlern zwischen zwei aufeinanderfolgenden Betätigungszeitpunkten kann zum Verlust der Sicherheitsfunktion führen.

Konstruktive Merkmale der Steuerung

Die realisierte Steuerung verfügt über folgende konstruktive Merkmale:

- Grundlegende und bewährte Sicherheitsprinzipien sowie Anforderungen der Kategorie B werden eingehalten. Schutzbeschaltungen (z. B. Kontaktabsicherung) sind vorgesehen.
- Die Sensoren befinden sich mechanisch stabil montiert im HLG-Gehäuse, so dass die Einhaltung der Sensor-Schaltabstände sichergestellt ist.

- Die Zuleitungen zu den Positionsschaltern und den weiteren Steuerungselementen (Verstärker, Grenzwertschalter) sind je Kanal getrennt oder geschützt verlegt.
- Die Sicherheits-Kleinsteuerung (Logikeinheit) K1 erfüllt alle Anforderungen der Kategorie 4 und PL=e.
- Die Schütze Q1 und Q2 besitzen zwangsgeführte Kontaktelemente entsprechend DIN EN 60947-5-1, Anhang L.

Kategorie 4 wird eingehalten, da nicht mehrere Sensoren hintereinander geschaltet werden (keine Kaskadierung), sondern ein einziger Sensor in jeweils einem vollständig parallel ausgeführten Kanal von der Steuerung (Logikeinheit) überwacht wird, da sonst keine Fehlererkennung möglich ist.

5.2.2.2 Start-/Wiederanlauffunktion

Anforderungen an die Start-/Wiederanlauffunktion sind in der DIN EN 60204-1 definiert.

- Hiernach darf der Start des Betriebes einer Maschine nur möglich sein, wenn alle entsprechenden Sicherheitsfunktionen und/oder Schutzmaßnahmen in der richtigen Stellung und betriebsbereit sind.
- Es müssen geeignete Verriegelungen vorgesehen werden, um eine einwandfreie Anlauffolge sicherzustellen.
- Ein Wiederanlauf darf nur dann automatisch erfolgen, wenn keine Gefährdungssituation bestehen kann.

HLG und Start-/Wiederanlauffunktion

Die Anforderungen der DIN EN 60204-1 bedeuten für HLG, dass ein Betrieb erst ermöglicht werden darf, wenn alle Sensoren, die zur Ausführung einer Sicherheitsfunktion (i. d. R. Strahlisolierung) erforderlich sind, den bestimmungsgemäßen Betrieb freigeben, u. a.:

- Auflagekontrolle
- Werkstück-/Objektkontrolle
- Abstandskontrolle
- Lagekontrolle
- Strahlführungskontrolle
- weitere Kontrollen (u. a. für Prozessgas, LGAC-Absaugung[2])

Vom Lasergerät muss die Betriebsbereitschaft ebenfalls signalisiert werden (sicherheitsgerichtete Ausgänge der Lasergerätesteuerung).

Durch die Anlauffolge muss sichergestellt sein, dass die potenziell gefahrbringenden Tätigkeiten mit dem HLG (Prozessstart mit Laserstrahlungsemission) manuell mittels Zustimmungstaster als letzter (übergeordneter) Schritt freigegeben werden; d. h. im Umkehrschluss, dass erst nachdem sich das HLG in betriebsbereiter Position bzw. bestimmungsgemäßen Zustand befindet, der Laserbearbeitungsprozess bewusst manuell mit Hilfe des Zustimmungstasters gestartet werden kann.

Dieses bedeutet, dass die Signalverarbeitungseinheit/Logik (z. B. Sicherheits-Kleinsteuerung) derart konfiguriert werden muss, dass die Eingangssignale der Sicherheitsfunktionen logisch mit der Bool´schen Funktion „UND“ verknüpft werden. Durch

---

[2] LGAC= laser-generated air contaminants (lasergenerierte Luftschadstoffe)

eine Verriegelung (z. B. verschiedene Ebenen, zeitliche Verriegelung) kann erst sequentiell mittels Zustimmtaster über die Signal-Verknüpfung „UND“ das Startsignal von der Signalverarbeitungseinheit/Logik ausgegeben werden. Die schaltungstechnische Realisierung und Programmierung hängt von der jeweils verwendeten Sicherheits-Kleinsteuerung und ihren technischen Optionen ab.

Ein Stopp-Signal einer Steuerungsfunktion hat bei dieser Konfiguration zur Folge, dass der erneute Start folgenden Ablauf erfordert:
1) der/die Zustimmschalter muss/müssen losgelassen werden,
2) das HLG muss neu positioniert werden, d. h. alle Sensoren geben das Signal „on“,
3) der/die dreistufige Zustimmungstaster muss/müssen bis zur Mittelstellung gedrückt werden,

→ der Laserbearbeitungsprozess und die Laserstrahlungsemission werden gestartet.

Eine oft aus Gründen eines toleranteren* Prozessablaufs gewählte Lösung bei HLG ist die gleichrangige „UND“-Verknüpfung der Sensorsignale und des Zustimmungsschalters. Hierdurch erfolgt zwar eine bewusste generelle Startfreigabe; der Bediener kann aber nicht unbedingt vorhersehen, wann genau sich das HLG in der/im bestimmungsgemäßen Position/Zustand befindet und der Sensor das entsprechende Eingangssignal (Laseremission) an die Steuerung übermittelt. Dieses quasi „automatische Anlaufen“ kann je nach Applikation des HLG zu „unklaren“ und damit potenziell gefahrbringenden Zuständen führen.

*Beispielhafte HLG-Anwendung zur Reinigung/Abtragen von Werkstücken, bei denen Prozessunterbrechungen akzeptiert werden können:

- temporäre kleine Lageänderungen (z. B. HLG↔Werkstück) können zum Stopp des Prozesses und der Laserstrahlungsemission führen, die aber durch Nachführen des HLG oder durch die Geometrie des Werkstücks im weiteren Bearbeitungsverlauf ausgeglichen werden, so dass ein erneuter Start (Wiederanlauf) erfolgt.

5.2.2.3 Vermeidung des unerwarteten Anlaufs

Bei der Konfiguration der Steuerung eines HLG ist neben den (Stopp-) Halt-Kategorien gemäß DIN EN 60204-1 zu definieren, wie ein unerwarteter Anlauf vermieden wird.

Anlauf wird gemäß DIN EN 1037/ISO 14118 definiert als „der Übergang vom Ruhezustand zur Bewegung einer Maschine oder eines ihrer Teile“, wobei andere als Bewegungsfunktionen explizit mit eingeschlossen sind, wie hier z. B. das Einschalten eines Laserstrahls.

Unter einem unerwarteten Anlauf versteht man jeden Anlauf der verursacht wird durch alle Arten von Energie, wie:

- einen durch einen Ausfall in der – oder durch einen äußeren Einfluss auf die – Steuerung erzeugten Start-Befehl;
- einen Start-Befehl, der durch eine Fehlbedienung eines Start-Stellteils oder eines anderen Teils der Maschine erzeugt wird, wie z. B. eines Sensors oder eines Leistungssteuerelements;
- Wiederkehr der Energiezufuhr nach einer Unterbrechung;
- äußere/innere Einflüsse (Schwerkraft, Wind,…) auf Teile der Maschine.

Entscheidende Kriterien in Bezug auf die Konfiguration der konstruktiven Sicherheitsmaßnahmen ergeben sich aus der Risikoanalyse nach DIN EN ISO 14121 und der DIN EN 60204-1.

Maßnahmen zur Vermeidung eines unerwarteten Anlaufs sind (in der Reihenfolge):

- Energietrennung und -ableitung
- Weitere Maßnahmen wie
  - Maßnahmen zur Vermeidung zufällig erzeugter Start-Befehle durch äußere oder innere Einflüsse auf jeden Teil der Maschine;
  - Maßnahmen – abhängig von der Systemgestaltung/-architektur – um zu verhindern, dass zufällig erzeugte Start-Befehle zu einem unerwarteten Anlauf führen;
  - Maßnahmen, die automatisch den gefährdenden Teil der Maschine stillsetzen, bevor eine gefährliche Situation durch unerwarteten Anlauf dieses Teils entstehen kann;
- Zusätzliche Maßnahmen, wie Signalisieren und/oder Warnen.

HLG und Vermeidung eines unerwarteten Anlaufs

In Bezug auf HLG ist es sinnvoll, die Vermeidung unerwarteter Anläufe aus folgenden Stopp- bzw. Halt-Zuständen zu unterscheiden (siehe auch Abschnitt 5.2.2.1).

Drei-Level-Ansatz:

1 aus Halt-Zuständen (Isolation der Laserstrahlung), die aufgrund eines Sensorsignals (z. B. zeitweiliges Abheben des HLG vom Werkstück) erreicht werden und aus typischen Vorgängen während der Bearbeitung (des bestimmungsgemäßen Betriebs) resultieren;

2 aus Not-Halt-Zuständen (Isolation der Laserstrahlung), die aufgrund eines Sensorsignals (z. B. Temperatursensor detektiert zu hohe Temperatur im Strahlengang aufgrund Störungen in der Strahlführung) erreicht werden und aus einer Störung mit erhöhtem Sicherheitsrisiko resultieren;

3 aus NOT-AUS-Zuständen, die einer Störung mit erhöhtem Sicherheitsrisiko für elektrischen Schlag – oder anderes Risiko elektrischen Ursprungs – eine vollständige Energietrennung (Strom; Medien, z. B. Gase, Kühlwasser; Laserstrahlung) erfordern.

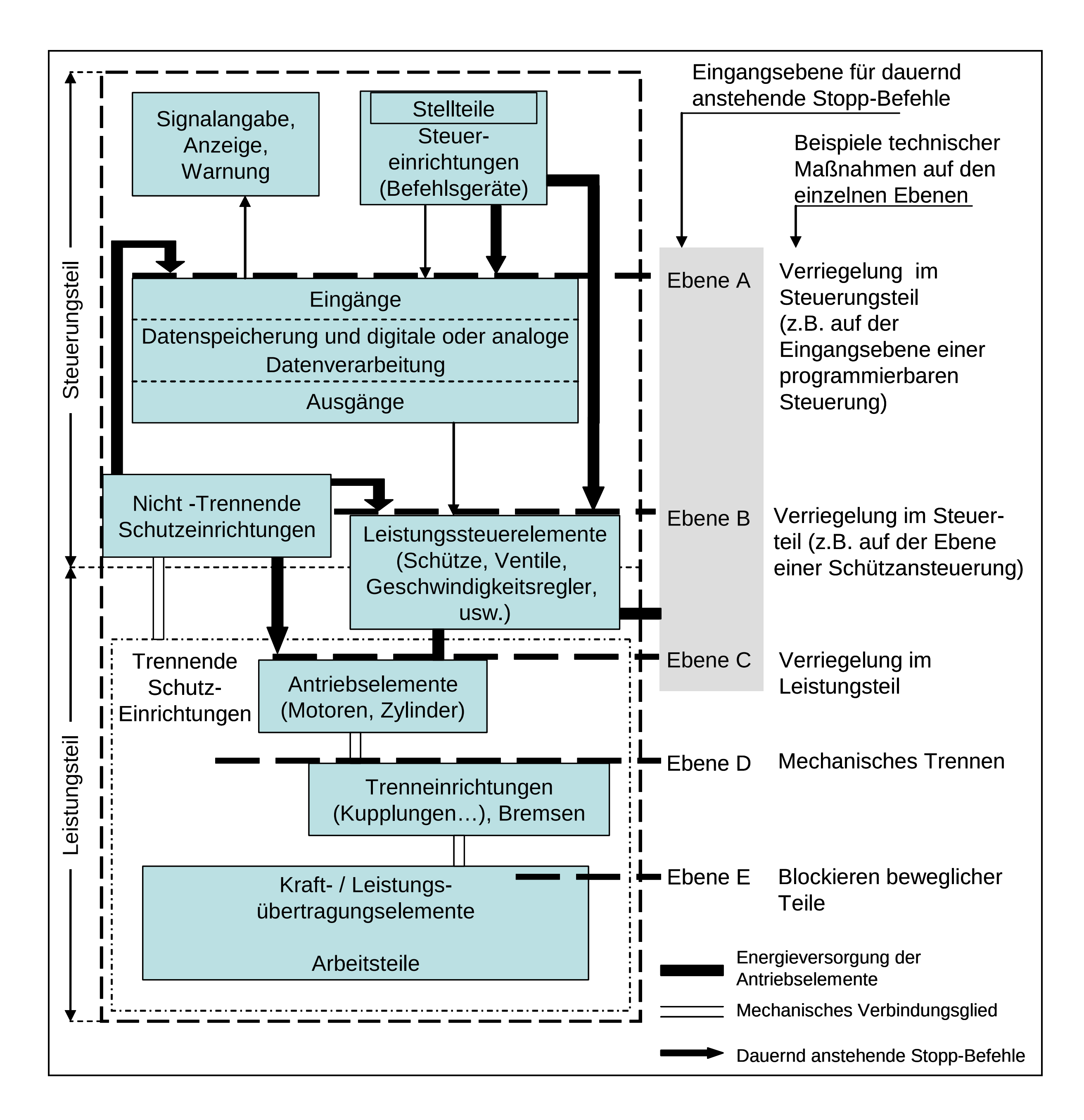


Abb. 5.2 Anwendung von Maßnahmen (außer denen für Energietrennung und -ableitung) zur Vermeidung eines von zufällig erzeugten Start-Befehlen verursachten unerwarteten Anlaufs

Ad 1)

Maßnahmen zur Vermeidung unerwarteten Anlaufs, d. h. unerwartete Laserstrahl-Freigabe können dadurch erreicht werden, dass nach jedem Halt durch z. B. Abheben der Aufsatzkontrolle, unzulässige Lageveränderung frei geführter HLG, die Steuerungszustände der Zweihandschaltung/Zustimmungstaster (DIN EN 574) auf „off“ gesetzt werden.

Die Laserstrahlfreigabe erfolgt somit erst

- nachdem alle sicherheitsgerichteten Sensoren wieder den sicheren Zustand signalisieren und

- die Zweihandschaltung durch entsprechendes erneutes manuelles Betätigen das Ausgangssignal („Laserstrahlfreigabe“) erzeugt (siehe auch Abschnitt 5.2.2.2 „Start-/Wiederanlauffunktion“).

Es handelt sich hierbei primär um eine Verriegelung im Steuerungsteil der Ebene A und der Ebene B gem. Abb. 5.2 (Leistungssteuerelemente: z. B. auf der Ebene des Strahlverschlusses oder der Schützansteuerung für die Laserleistungsversorgung). Die jeweilige Kombination aus SRP/CS muss die aus der Risikobeurteilung resultierenden PL_r erfüllen. Zu beachten ist, dass dieses auch für die Kombination mit Lasergeräteseitigen SRP/CS (Strahlverschluss, Schütze für Ansteuerung/Pumpen des Lasers) gilt. Die DIN EN 1037 definiert folgende Anforderungen an Leistungssteuerelemente: Leistungssteuerelemente (bei HLG z. B. Shutter, Schütze) müssen so ausgewählt und/oder eingesetzt werden, dass ihr Schaltzustand unter der Wirkung äußerer Einflüsse oder durch Störungen in der Energieversorgung sich nicht ändern kann.

Ad 2)

Wie in der DIN EN 1037/ISO 14118 definiert, kann das Stopp-Stellteil in der AUS-Stellung gesichert werden, um einen unerwarteten Anlauf durch unbeabsichtigt erzeugte Start-Befehle bei sicherheitsrelevanten Störungen zu verhindern. Konstruktiv muss sichergestellt sein, dass die vom Stopp-Befehlsgerät erzeugten Stopp-Befehle vor den Start-Befehlen Vorrang haben.

Bei HLG kann das Stopp-Stellteil auch als NOT-HALT ausgelegt werden, wenn ein Stopp der Kategorie 2 (Energie bleibt bestehen; Laserstrahlung wird isoliert) aufgrund der Risikoanalyse ausreicht.

Konstruktive Lösungsmöglichkeiten für HLG können nur unter Einbeziehung des jeweiligen Lasergeräts bzw. seiner Steuerung (Hardware und Software) betrachtet werden, da die trennenden Schutzeinrichtungen (Shutter, Schütze) und Verriegelungen typischerweise lasergeräteseitig angeordnet sind.

Erreicht werden muss, dass die erneute Laserstrahlfreigabe erst erfolgt, nachdem Verriegelungen im Level 2 rückgesetzt werden, d. h.

- nachdem eine z. B. mechanische Verriegelung (selbsthaltende Schütze oder Sicherheitsrelais oder NOT-HALT-Betätiger) manuell oder mithilfe eines Reset-Tasters wieder in die Position für den Betrieb versetzt werden, z. B. Wiedereinschalten der Steuerspannung/Versorgungsspannung des Lasergerätes) oder
- nachdem das System mittels einer elektronischen Verriegelung (Software-Reset) in der sicheren Lasergerätesteuerung zurückgesetzt wurde;

und Verriegelungen im Level 1 rückgesetzt werden, d. h.

- nachdem alle sicherheitsgerichteten Sensoren wieder den sicheren Zustand signalisieren und
- die Zweihandschaltung durch entsprechendes erneutes manuelles Betätigen das Ausgangssignal („Laserstrahlfreigabe“) erzeugt.

Maßnahmen zur Vermeidung unerwarteten Anlaufs und Wiedereinschaltens sollten in diesem Fall eine Verriegelung im Steuerungsteil und im Leistungsteil (Versorgungsspannung der Pumpdioden) aufweisen.

Ad 3)

Anhand der Risikobeurteilung ist zu entscheiden, ob für das gesamte HLG-System (inkl. Lasergerät sowie Versorgungs- und Entsorgungsgeräten) eine elektrische Gefährdung besteht. Für einige HLG-Systeme kann dieses (sicherlich) bejaht werden, insbesondere für HLG, bei denen aufgrund der Umgebungsbedingungen ein elektrisches Risiko durch Wasser, Feuchtigkeit oder Beschädigung von Versorgungsleitungen besteht. Entsprechend ist ein Stopp der Kategorie 0 einzuleiten.

Die HLG oder ihre vom Bediener getragenen HLG-Steuereinheiten (z. B. am Gürtelclip) oder in der Nähe des Bedieners platzierten mobilen HLG-Steuereinheiten sind mit einem NOT-AUS-Befehlsgerät ausgerüstet (siehe auch Abschnitt 5.2.2.5).

Diese mechanisch verriegelnden Befehlsgeräte erzeugen in Verbindung mit weiteren SRP/CS (Steuerung) ein Abschaltsignal in den Ebenen A bis C (Steuerteil und Leistungsteil).

Erreicht werden muss, dass die erneute Laserstrahlfreigabe erst erfolgt, nachdem Verriegelungen im Level 3, d. h. die Verriegelung des NOT-AUS-Tasters manuell rückgesetzt werden, und im Weiteren die Verriegelungen der Level 2 und 3 rückgesetzt werden.

5.2.2.4 Zweihandschaltung/Zustimmungsfunktion

Beide Einrichtungen gehören zu der Gruppe von Befehlseinrichtungen mit selbsttätiger Rückstellung (Tippschalter). Diese Geräte erfordern eine ständige Betätigung, um ein Ausgangssignal und damit einen Betrieb zu erreichen.

Zweihandschaltung

Die Zweihandschaltung ist gemäß DIN EN ISO 12100-1 den direkt wirkenden spezifischen Sicherheitsfunktionen zuzuordnen.
Mit der Sicherheitsfunktion soll das Risiko gemindert werden, Verletzungen oder Gesundheitsgefährdungen zu erleiden.

Die DIN EN 574 (ISO 13851) definiert die Zweihandschaltung wie folgt:

> „Einrichtung, die mindestens die gleichzeitige Betätigung durch beide Hände erfordert, um den Betrieb einer Maschine einzuleiten und aufrechtzuerhalten, solange eine Gefährdung besteht, um auf diese Weise eine Maßnahme zum Schutz nur der betätigenden Person zu erreichen (siehe auch Abb. 5.3)“.

Die Normen DIN EN 60204-1, Abschnitt „Andere Steuerfunktionen, Zweihandschaltung“ und die DIN EN 574 (ISO 13851) unterscheiden drei verschiedene Typen von Zweihandschaltungen, wobei die DIN EN 574 den Typ III nochmals in A, B und C unterteilt. Der Typ der Zweihandschaltung bestimmt die Funktionseigenschaften und die Mindestanforderungen an die Sicherheit. Die Auswahl für einen bestimmten Typ ergibt sich aus der Risikobeurteilung bzw. dem Grad der Risikominderung, die durch die Schaltung erreicht werden soll (siehe auch Anhang 3).

In Tab. 5.2 sind die Typen von Zweihandschaltungen und ihre Merkmale stichpunktartig angegeben.

Die Stellteile/Betätiger der Zweihandschaltung müssen mit einer Signalverarbeitungseinheit bzw. einer Logikeinheit verknüpft werden, um die Ausgangssignale zu generieren (siehe auch Abb. 5.3). Die diesbezüglich eingesetzte Hardware und/oder Software programmierbarer elektronischer Systeme müssen dabei ebenfalls die Sicherheitsanforderungen, die in der Risikobeurteilung bezüglich der Kombination der SRP/CS bestimmt wurden, erfüllen.

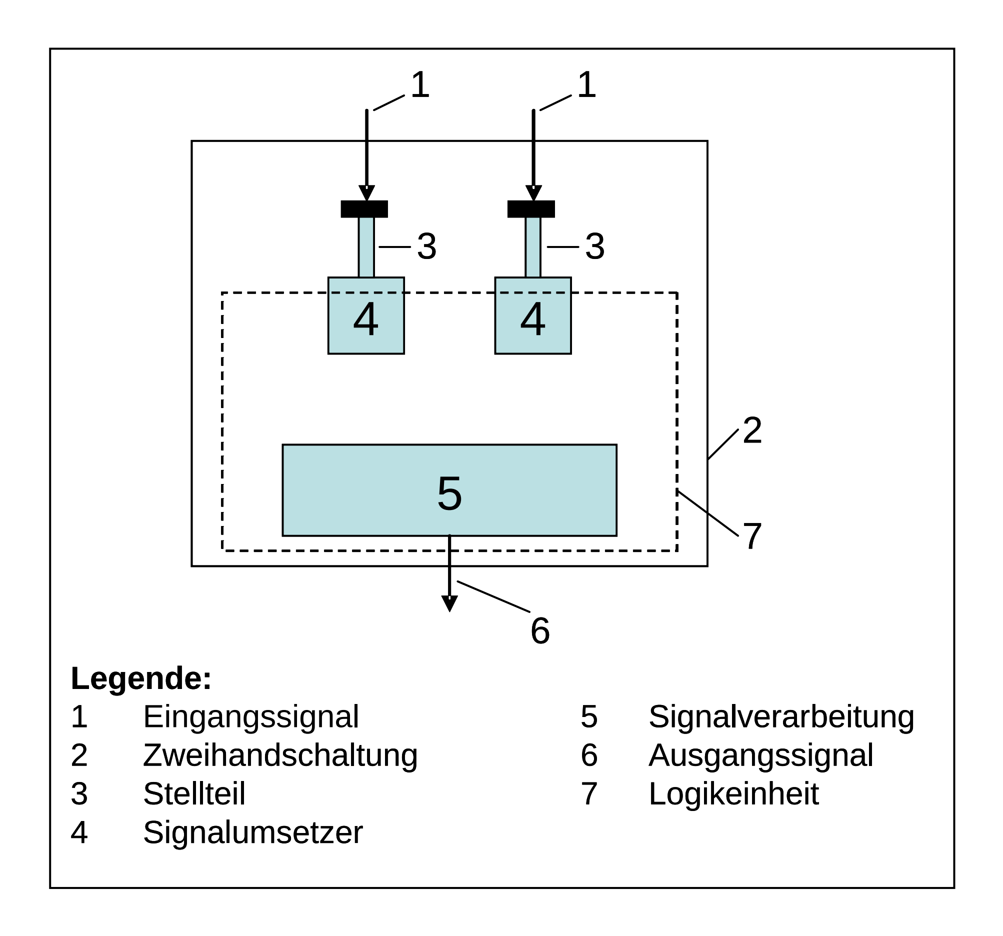


Abb. 5.3 Schematische Darstellung einer Zweihandschaltung gem. DIN EN 574 (ISO 13851)

Tab. 5.2 Liste der Typen von Zweihandschaltungen und der Mindestsicherheitsanforderungen

Anforderungen	Typen				
	I	II	III		
			A	B	C
Benutzung beider Hände (gleichzeitige Betätigung)	x	x	x	x	x
Beziehung zwischen Eingangssignalen und Ausgangssignal	x	x	x	x	x
Beendigung des Ausgangssignals (Maschinenbetrieb)	x	x	x	x	x
Vermeidung versehentlicher Betätigung	x	x	x	x	x
Vermeidung des Umgehens	x	x	x	x	x
Erneutes Erzeugen des Ausgangssignals	*)	x	x	x	x
Synchrone Betätigung Betätigung mit max. Zeitversatz ≤ 0,5 s			x	x	x
Anwendung der Kategorie 1 (DIN EN ISO 13849-1)	x		x		
Anwendung der Kategorie 3 (DIN EN ISO 13849-1)		x		x	
Anwendung der Kategorie 4 (DIN EN ISO 13849-1)					x
*) Anmerkung: Für die Auswahl von Typ 1 siehe DIN EN 574:2008-12, Abschnitt 5.5					

Benutzung beider Hände (gleichzeitige Betätigung):
Der Bediener muss beide Hände während des gleichen Zeitabschnittes benutzen, jede Hand an einem Stellteil, um die Zweihandschaltung zu betätigen die Betätigung ist unabhängig von dem zeitlichen Versatz zwischen dem Auslösen jedes der beiden Eingangssignale.

Beziehung zwischen Eingangssignalen und Ausgangssignal:
Die auf jedes der beiden Stellteile aufgebrachten Eingangssignale müssen zusammen das Ausgangssignal der Zweihandschaltung erzeugen und aufrechterhalten.

Beendigung des Ausgangssignals:
Das Loslassen eines oder beider Stellteile muss die Beendigung des Ausgangssignals einleiten.

Vermeidung versehentlicher Betätigung:
Die Wahrscheinlichkeit einer versehentlichen Betätigung der Stellteile muss auf ein Minimum reduziert werden.

Vermeidung des Umgehens:
Die Schutzwirkung einer Zweihandschaltung darf nicht einfach umgangen werden können.

Erneutes Erzeugen des Ausgangssignals:
Das erneute Erzeugen des Ausgangssignals darf nur möglich sein, nachdem beide Stellteile zuvor losgelassen wurden.

Synchrone Betätigung:
Ein Ausgangssignal darf nur dann erzeugt werden, wenn beide Stellteile in einem Zeitabschnitt (Zeitversatz) ≤ 0,5 s betätigt werden; wenn diese Zeitspanne überschritten wird, müssen beide Stellteile losgelassen werden, bevor ein Maschinenbetrieb erneut eingeleitet werden kann.

Zustimmungsschalter

Zustimmungsschalter sind Sicherheitsschalter, die für potenziell gefahrbringende Zustände/Betriebsarten verwendet werden. Sie gehören gem. DIN EN 60204-1 zu den Geräten zur Freigabesteuerung. Man unterscheidet sie nach ihrer Ausführungsform in Zwei-Stellungs- und Drei-Stellungs-Zustimmschalter.

Zustimmschalter führen folgende Funktionen aus:
- bei Betätigung schalten sie ein Ausgangssignal, dass den Prozess/die Maschine in Betrieb setzt
- bei Nicht-Betätigung
  - leiten sie eine Halt-Funktion ein und
  - verhindern sie den Start des Prozesses/der Maschine.

Geräte zur Freigabesteuerung müssen so ausgesucht und angeordnet werden, dass die Möglichkeit einer Umgehung minimiert ist (siehe auch Zweihandschaltung).

Die Betätiger werden – ähnlich zur Zweihandsteuerung – mit einer Signalauswerteeinheit und/oder Logik kombiniert, um die Ausgangssignale zu generieren; man spricht dabei von einem Zustimmgerät. Die DIN EN 60947-5-8 definiert ein Zustimmgerät als „ein handbetätigtes Steuergerät, das in Verbindung mit einem Anlaufsteuergerät bei Dauerbetätigung einen Maschinenbetrieb erlaubt“.

Dabei muss das Zustimmgerät als Kombination von SRP/CS die erforderlichen Performance Level PL_r bzw. Steuerungskategorien gem. DIN EN ISO 13849-1 erfüllen, die im Rahmen der Risikobeurteilung ermittelt wurden.

Zwei-Stellungs-Zustimmschalter (auch 2-stufiger Zustimmschalter) schalten in Stufe 2 das Ausgangssignal. Beim Loslassen des Betätigers (Stufe 1) wird das Ausgangssignal abgeschaltet. 2-stufige Zustimmschalter dürfen nur verwendet werden, wenn zusätzlich ein NOT-AUS-Befehlsgerät in unmittelbarer Nähe angeordnet ist.

Tab. 5.3 Einteilung der Zustimmschalter

Schaltertyp / Stufe	2-stufige Zustimmschalter	3-stufige Zustimmschalter
Stufe 1	AUS-Funktion (Stellteil nicht gedrückt)	AUS-Funktion (Stellteil nicht gedrückt)
Stufe 2	Zustimmfunktion (Stellteil gedrückt)	Zustimmfunktion (Stellteil gedrückt)
Stufe 3	nicht vorhanden	AUS-Funktion (Stellteil über die Mittelstellung hinaus gedrückt)
Zusätzlich	NOT-AUS-Befehlsgerät in unmittelbarer Nähe	entfällt

- Sicherheitstechnisch ist ein 3-stufiger Zustimmschalter einem 2-stufigen vorzuziehen.
- Der Vorteil des 3-stufigen Zustimmschalters ist, dass der Bediener im Fall einer NOT-Situation aufgrund einer plötzlichen gefährlichen Bewegung zwei Optionen hat (Loslassen oder Durchdrücken), um eine sichere Abschaltung zu erreichen.
- Empirische Untersuchungen haben aufgezeigt, dass der Mensch in Schrecksituationen eher dazu neigt zu verkrampfen, d. h. den Schalter durchzudrücken, anstatt loszulassen.

Anforderungen an Drei-Stellungsschalter sind in der Norm DIN EN 60947-5-8 definiert. Drei-Stellungs-Zustimmschalter (oder auch 3-stufiger Zustimmschalter) müssen in einer definierten Mittelpunktlage (Stufe 2) gehalten werden, um ein Ausgangssignal zu erzeugen. Das Loslassen des Betätigers (Stufe 3), wie auch das feste Zugreifen in Gefahrensituationen (Stufe 1) führen zur Abschaltung des Ausgangssignals. Eine weitere Sicherheitsforderung an einen dreistufigen Zustimmungsschalter ist, dass die Kontakte bei der Rückstellung von Stufe 3 nach Stufe 1 in der Stufe 2 nicht geschlossen werden, damit keine kurzzeitige Aktivierung des Ausgangssignals (der Maschine) erfolgt. Der Schalter muss über zwangsöffnende Kontakte in Stufe 1 und Stufe 3 verfügen. Mit einer redundanten Kontaktkonfiguration (2-kanal) erreichen diese Schalter Steuerungskategorie 4.

Um Verwechslungen mit NOT-AUS-Geräten zu vermeiden, darf der Betätiger eines Zustimmschalters nicht ROT sein (vorteilhaft sind Signalfarben wie u. a. gelb; die Farben müssen mit Laserschutzbrillen – wenn Tragegebot besteht – wahrnehmbar sein).

HLG und Zweihandschaltung sowie Zustimmungsfunktion

Bezüglich HLG soll mit der Sicherheitsfunktion das Risiko gemindert werden, Verletzungen oder Gesundheitsgefährdungen durch Laserstrahlung zu erleiden. Insbesondere sollen die äußeren Gliedmaßen des Bedieners (Unterarme, Hände, Finger) vor einer unbeabsichtigten Laserstrahlungsexposition während des bestimmungsgemäßen Betriebs des HLG und in vorhersehbaren Fehlerfällen (z. B. Bewegen einer Hand/eines Fingers vor die Laser-Austrittsöffnung des HLG) geschützt werden. Eine derartige Exposition ist bei HLG mit offener Prozesszone möglich. Ausgenommen sind Aufsatzgeräte, die mit dem Werkstück einen geschlossenen Prozessraum bilden und bei denen dieser Zustand steuerungstechnisch sicher überwacht wird.

Die im Abschnitt 3.3 bestimmten PL_r verdeutlichen, dass die Anforderungen an eine Zweihandschaltung bei HLG im Bereich PL_r=c/d (Haut) und PL_r=e (Auge) liegen. Dieses entspricht Steuerungskategorien Kat. 3 oder Kat. 4. Die Steuerungskategorie von Zweihandschaltungen darf nicht geringer sein als die des entsprechenden SRP/CS der Maschinensteuerung.

Gemäß Tab. 5.2 können somit Zweihandschaltungen vom

- Typ II (Kat. 3),
- Typ III B (Kat. 3),
- Typ III C (Kat. 4),

angewendet werden.

Typ II und Typ III B Zweihandschaltungen müssen folgenden Anforderungen genügen:

- der Einzelfehler in der Zweihandschaltung darf nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion führen,
- die Zweihandschaltung darf durch den einen Fehler nicht zu einer Einhandschaltung werden,
- es darf als Folge des einen Fehlers kein Ausgangssignal erzeugt werden.

Typ III C muss folgende Anforderungen erfüllen:

- der einzelne Fehler muss bei oder vor der nächsten Bedienung der Sicherheitsfunktion erkannt werden,

- nach dem Auftreten eines Fehlers darf es nicht möglich sein, erneut ein Ausgangssignal zu erzeugen,
- ein Ausgangssignal, das während der Zeit des Auftretens eines Fehlers erzeugt wird, darf bestehen bleiben, muss aber beendet werden, wenn ein oder beide Signale zurückgezogen werden. Eine Kombination weiterer Fehler darf nicht zu einem Verlust der Sicherheitsfunktion führen.

Generell müssen die Stellteile einer Zweihandschaltung entsprechend der Risikobeurteilung für die jeweilige HLG-Anwendung so konstruiert und angeordnet sein, dass die Schutzwirkung der Zweihandschaltung nicht auf einfache Weise zu umgehen und die Wahrscheinlichkeit einer versehentlichen Betätigung möglichst gering ist. Das Gehäuse der Stellelemente und ihre Befestigung müssen derart ausgeführt werden, dass sie den zu erwartenden Betriebsbelastungen und Umwelteinflüssen standhalten. Weitere Anforderungen sind in der DIN EN 574 angegeben.

Mit Bezug zum Umgehen der Zweihandschaltung durch äußere Gliedmaßen (Hand, Unterarm, Ellbogen) ist bei den meisten HLG aufgrund der Bauform und der Anwendungen das „Umgehen mit einer Hand“ sowie das „Umgehen durch Blockieren eines Stellteils“ von größter Relevanz.

Zur Vermeidung des Umgehens mit einer Hand sollten die Stellteile bzw. Bedienelemente des HLG daher so positioniert werden, dass sie einen Abstand ≥ 260 mm aufweisen. Zum Teil stehen dieser Anforderung ergonomische Gründe entgegen, da die Bauform von HLG möglichst kompakt sein sollte. In diesen Fällen kann durch geschickte Anordnung der Stellteile und/oder Konstruktion des HLG-Gehäuses eine Umgehung mit einer Hand vermieden werden. Konstruktive Maßnahmen sind u. a. Gehäuseteile des HLG zwischen den Griffen/Stellelementen oder erhöhte Zonen (Gehäuseteile). Ziel ist, dass die Stellteile mit den Enden einer 260 mm langen Schnur, die die Handspanne darstellt, nicht erreicht werden können.

Mit Umgehen durch Blockieren (u. a. Verkleben, Verklemmen) eines Stellteils wird die Zweihandschaltung zu einer Einhandschaltung. Dieses bedeutet, dass aufgrund der Blockade eines Stellteils das diesbezügliche Eingangssignal dauerhaft ansteht. Ein Ausgangssignal kann somit mit nur einer Hand (durch Betätigen des zweiten Stellteils) erzeugt werden. Zur Vermeidung von Umgehen durch Blockieren eines Stellteils sind folgende Maßnahmen zu berücksichtigen:
- Bedingungen des Wiederanlaufs,
- Bedingungen der synchronen Betätigung.

Bezüglich der Sicherheit gegenüber Umgehung mit einer Hand und durch Blockieren eines Stellteils sowie dem Schutz vor Wiederanlauf sollte daher eine synchrone Betätigung der Stellteile von Zweihandschaltungen bei HLG vorgesehen werden (wenn nicht gemäß Risikobeurteilung ohnehin erforderlich). Ein Ausgangssignal bzw. eine Freigabe der Laserstrahlungsemission darf nur dann erzeugt werden, wenn beide Betätiger in einer Zeitspanne ≤ 0,5 s betätigt werden (vgl. DIN EN 574). Wenn diese Zeitspanne überschritten wird, müssen beide Betätiger losgelassen werden, bevor die Laserstrahlungsemission erneut freigegeben werden kann. Dieses bedingt die Verwendung einer Zweihandschaltung vom Typ III B oder Typ III C.

Die Betätiger/Stellelemente der Zweihandschaltung müssen mit entsprechenden Auswerteeinheiten verknüpft werden. Dieses können spezielle Sicherheitsbausteine (Hardware) oder programmierbare elektronische Systeme (PLC) sein, wie z. B. eine Sicherheits-Kleinsteuerung. Die Auswerteeinheiten müssen ebenfalls den Anforderungen, die sich aus dem erforderlichen Performance Level (PL_r) ergeben, als Kombination von SRP/CS zur Ausführung einer Sicherheitsfunktion erfüllen.

Die Betätiger der Zweihandschaltung sind als Zustimmschalter auszuführen. Insbesondere für HLG-Anwendungen, bei denen das Risiko besteht, dass der Bediener in Gefahrensituationen u. a. selbst oder mit dem HLG abrutschen, abgleiten oder stürzen kann und keine weiteren Maßnahmen (wie u. a. Beschleunigungs- oder Lagesensoren) eingesetzt werden, sind Drei-Stellungs-Zustimmschalter vorrangig zu verwenden und den Zwei-Stellungs-Zustimmschaltern vorzuziehen.

5.2.2.5 Funktion zum Stillsetzen im Notfall (NOT-HALT, NOT-AUS)

Gestaltungsleitsätze für die NOT-HALT-Funktion sind in der DIN EN 13850 definiert. Zwar findet diese Norm explizit keine Anwendung auf von „Hand tragbare und handgeführte Maschinen", das HLG wird aber im Rahmen dieser Ausführungen als Teil der gesamten Laserbearbeitungsmaschine betrachtet, die das Lasergerät sowie weitere Peripheriegeräte (z. B. Kühler, Absaugung, Filtration) beinhaltet. (s. a. DIN EN 60745-1 handgeführte motorbetriebene Elektrowerkzeuge).

Die Norm DIN EN ISO 13850:2007 hat eine Anpassung der Terminologie an die DIN EN ISO 12100-1 erfahren. Diesbezüglich wird gemäß der DIN EN ISO 13850 im Folgenden für Emergency-Stop (zurückgezogene DIN EN 418 "NOT-AUS") der Begriff NOT-HALT verwendet. Anzumerken ist, dass in der aktuellen DIN EN 60204-1:2007 zwischen NOT-HALT und NOT-AUS hinsichtlich der Sicherheitsfunktion unterschieden wird; in den weiteren Ausführungen wird versucht, diesen Sachverhalt ebenfalls zu berücksichtigen.

Anforderungen an die NOT-HALT-Geräte und deren Funktion

Anforderungen an NOT-HALT-Geräte und deren Funktion sind in der DIN EN 13850 sowie der DIN EN 60204-1 definiert.

Die NOT-HALT-Funktion muss durch eine menschliche Handlung, d. h. manuell, ausgelöst werden. Als Ergebnis der Risikobeurteilung muss die NOT-HALT-Funktion entweder einen Stopp der Stopp-Kategorie 0 oder einen Stopp der Stopp-Kategorie 1 ausführen. Sie muss gegenüber allen anderen Funktionen und Betätigungen in allen Betriebsarten Vorrang haben. Die Energiezufuhr zu den „Maschinenantrieben", die eine gefahrbringende Situation verursachen können, muss ohne Erzeugung anderer Gefährdungen entweder unverzüglich unterbrochen werden (Stopp-Kategorie 0) oder so gesteuert werden, dass die gefahrbringende „Bewegung" in geeigneter Weise (u. a. optimale Verzögerungsrate, Stopp-Kategorie, Stillsetzungsreihenfolge) angehalten wird; weitere Funktionen, wie u. a. das Bremsen, Unterbrechen und Abschirmen können Teil der NOT-HALT-Funktion sein.

Geräte für NOT-HALT müssen an jedem Bedienstand sowie an anderen Orten vorhanden sein, wo die Einleitung eines NOT-HALT erforderlich sein kann. Sie müssen leicht erreichbar und gefahrlos zu betätigen sein. NOT-HALT-Geräte können als Drucktasten betätigter Schalter, als Reißleinenschalter oder in besonderen Fällen als Fußschalter (ohne mechanische Schutzhaube) ausgeführt sein.

Die Wirkung eines NOT-HALT-Befehls (oder NOT-AUS) muss bis zu seiner Rückstellung erhalten bleiben; d. h. die Rückstellung darf nur durch eine manuelle Handlung am Ort möglich sein, wo der Befehl eingeleitet wurde. Die Rückstellung darf die Maschine nicht wieder in Gang setzen, sondern dieses nur ermöglichen (siehe auch Abschnitt 5.2.2.3: „Vermeidung eines unerwarteten Anlaufs").

Zu beachten ist, dass eine NOT-HALT-Funktion (bzw. NOT-AUS) eine ergänzende Schutzmaßnahme ist, die kein primäres Mittel zur Risikominderung der Gefährdungen darstellt, wie z. B. konstruktive Maßnahmen (Sensoren, Logik, Aktuatoren), die einen sicheren Stopp einer Maschine ausführen.

Anforderungen an die NOT-AUS Geräte und deren Funktion

Weitere, näher spezifizierte Anforderungen sind in der DIN EN 60204-1 definiert. Hiernach führt die NOT-AUS-Funktion das Abschalten der elektrischen Energieeinspeisung mittels elektromechanischer Schaltelemente aus; weitere Funktionen, wie u. a. das Bremsen, Unterbrechen, Abschirmen können Teil der NOT-AUS-Funktion sein. Es handelt sich hierbei um ein ungesteuertes Stillsetzen durch sofortiges Unterbrechen der Energiezufuhr, d. h. es erfolgt ein Stopp der Stopp-Kategorie 0. Gemäß DIN EN 60204-1 muss die NOT-AUS-Funktion analog zur NOT-HALT-Funktion gegenüber allen anderen Funktionen und Betätigungen in allen Betriebsarten Vorrang haben.

Ist für bestimmte Maschinen eine Stopp-Kategorie 0 (Abschalten der Energie) nicht zulässig, d. h. dass der Stopp aufgrund des ungesteuerten Stillsetzens zu einer Gefahrenerhöhung führt, müssen andere Maßnahmen getroffen werden (z. B. SELV, PELV), so dass ein NOT-AUS nicht notwendig ist. Dieses ist für jeden Anwendungsfall im Rahmen der Risikobeurteilung zu klären (z. B.: Trennen der Gasversorgung).

Bezüglich der Anordnung und Ausführung von NOT-AUS-Geräten gilt Gleiches wie für NOT-HALT-Geräte.

HLG und Funktion zum *Stillsetzen im Notfall*

Für HLG in Verbindung mit einer Laseranordnung ist in einem ersten Schritt zu klären, welche gefahrbringenden Situationen durch NOT-HALT-Funktionen, d. h. durch Stillsetzen von Prozessen/Bewegungen oder des Betriebes, abgewendet oder gemindert werden sollen.

Gefahrbringende Situationen können u. a. hervorgerufen werden durch:
- Laserstrahlung (Isolierung oder Deaktivierung)
- Medien (u. a. Isolierung von Prozessgasen, Kühlwasser)
- Hilfsantriebe (Stillsetzen von Vorschub-Hilfsantrieben)
- elektrische Energie (Schutz gegen direktes Berühren)

Anhand des Ergebnisses der Risikobeurteilung in Verbindung mit dem Konzept zur Risikominderung wird entschieden:
- bei welchen Gefährdungen,
- welche Prozesse/Bewegungen/welcher Betrieb
- in welcher Form
  - optimale Verzögerungsrate,
  - Auswahl der Stopp-Kategorie,
  - Stillsetzungsreihenfolge

durch manuelles Betätigen von NOT-HALT-Geräten angehalten werden.

Typischerweise wird die NOT-HALT-Funktion bei HLG so ausgelegt, dass bei manueller Betätigung der NOT-HALT-Geräte primär eine Isolierung der Laserstrahlung erfolgt (u. a. Schließen des Shutters oder Deaktivierung der Laserstrahlung z. B. durch Trennung der Versorgungsspannung zu den Laserpumpdioden). Dies entspricht einem gesteuerten Stillsetzen (Stopp-Kategorie 1). Sie kann auch dazu ver-

wendet werden (insbesondere in Verbindung mit der Laseranordnung), weitere Energien abzuschalten, z. B. Prozessgase, Absaugluftströme, Hilfs-Antriebselemente.

- Beispielhaft kann ein HLG, das in Schutzklasse III, d. h. mit SELV oder PELV betrieben wird, und von dem kein Risiko für elektrischen Schlag ausgeht, mit einem NOT-HALT-Gerät ausgestattet sein, um die Laserstrahlung zu isolieren.

Ergänzend (gem. Risikobeurteilung), kann es allerdings auch erforderlich sein, ein vom Lasergerät in Verbindung mit Peripheriegeräten (u. a. Kühler, Gasversorgung, Absaugung, Filter) in Gefahrensituation durch Elektrizität verursachtes Risiko durch Unterbrechen der Energiezufuhr zu vermindern. Das NOT-HALT-Gerät (bzw. gem. DIN EN 60204-1: NOT-AUS-Gerät) muss in diesem Fall in Verbindung mit der Sicherheitssteuerung die Schütze zur Einspeisung der elektrischen Energie zum Lasergerät und zu den Peripheriegeräten abschalten.

Dieses bedeutet, dass an geeigneten Positionen (Bedienstand), z. B. am HLG (wenn baulich möglich), zumindest aber am leicht erreichbaren HLG-Steuergerät (oder anderen Positionen: z. B. tragbar am Gürtelclip) und am Lasergerät ein NOT-HALT (bzw. nach DIN EN 60204-1: ein NOT-AUS-Gerät) angeordnet wird.

Im Rahmen der Risikobeurteilung ist auch zu prüfen, ob ein NOT-HALT-Gerät außerhalb des Gefahrenbereiches (Laserbereiches) platziert wird, um zu gewährleisten, dass Rettungskräfte gefahrlos in den Laserbereich eintreten können.

Wenn es gemäß der Risikobeurteilung notwendig ist, das HLG-System (HLG und Laseranordnung) mit mehreren NOT-HALT-Geräten unterschiedlicher Funktionen zu versehen (generell sollte dieses vermieden werden), dann müssen Mittel vorgesehen werden, um Verwechselungen zwischen diesen Einrichtungen zu verhindern.

- Beispielhaft kann ein HLG (oder die Steuerbox) bauseitig mit einem NOT-HALT-Gerät versehen sein, dass in Verbindung mit der Steuerung die Funktion „Isolierung der Laserstrahlung“ ausführt: Ein weiteres NOT-HALT-Gerät (oder gemäß DIN EN 60204-1: NOT-AUS-Gerät) kann sich am Steuerschrank der Laseranordnung befinden und führt die Funktion „Trennung des HLG-Systems von der elektrischen Energie“ aus.

Weitere in der DIN EN ISO 13850 sowie DIN EN 60204-1 genannten Anforderungen für NOT-HALT- und NOT-AUS-Geräte sind zu beachten.

5.2.2.6 Schwankungen, Verlust und Wiederkehr der Energiequellen/Unterspannungsschutz

Anforderungen sind in der DIN EN 60204-1 im Abschnitt „Schutz bei Unterbrechung der Versorgung oder Spannungseinbruch und Spannungswiederkehr“ definiert.

Ein Unterspannungsschutz muss vorgesehen werden, wenn eine Unterbrechung der Versorgung oder ein Spannungseinbruch eine gefahrbringende Situation verursachen kann. Die Sicherheitsfunktion „Unterspannungsschutz“ schaltet die Maschine bei einem vorbestimmten Spannungswert ab und überführt sie in einen sicheren Zustand.

Kann ein kurzzeitiger Spannungseinbruch erlaubt werden, darf ein verzögerter Unterspannungsschutz vorgesehen werden. Das Auslösen dieser Unterspannungsschutzeinrichtung darf die Wirkung jedweder Stillsetzungssteuerung nicht beeinträchtigen.

Bei Spannungswiederkehr oder beim Einschalten der Versorgung muss ein automatischer oder unerwarteter Wiederanlauf der Maschine durch geeignete Maßnahmen dann verhindert werden, wenn durch ihn eine gefahrbringende Situation verursacht werden kann.

Überstromschutz/Überspannungsschutz

Im Abschnitt „Überstromschutz“ der DIN EN 60204-1 sind diesbezügliche Anforderungen formuliert. Ein Überstromschutz ist vorzusehen, wo der Strom in einem Maschinenstromkreis entweder den Bemessungswert eines Bauteils oder die Strombelastbarkeit der Leiter überschreiten kann, – je nachdem welcher der niedrigere Wert ist – und sich hieraus ein gefahrbringender Zustand ergeben kann. Überstromschutzeinrichtungen sind derart auszulegen, dass die Bemessungs-Abschaltleistung für Kurzschluss mindestens ebenso groß sein muss, wie der am Einbauort zu erwartende Fehlerstrom.

HLG und Schwankungen, Verlust und Wiederkehr der Energiequellen

Bei HLG lassen sich im Wesentlichen zwei unterschiedliche Konstruktionstypen von Steuerungen unterscheiden:

1. Verwendung einer Sicherheits-Kleinsteuerung
2. Einsatz von Sicherheitsbausteinen (z. B. PNOX)

ad 1)

Sicherheits-Kleinsteuerungen, (wie auch die für den HLG-Funktionsträger verwendete ELAN Protect) verfügen typischerweise über eine interne Überspannungs- wie auch Unterspannungsüberwachung. Wird die Sicherheits-Kleinsteuerung von demselben Netzteil versorgt, wie weitere elektrische/elektronische SRP/CS im HLG, so kann die Spannung mittels der Sicherheits-Kleinsteuerung überwacht werden. Die Steuerung erlaubt eine Pufferung von Spannungseinbrüchen < 10 ms ohne Einleitung einer Funktion. Bei Spannungseinbrüchen von einer Dauer 1 s > t > 10 ms erfolgt die Einleitung einer internen sicherheitsgerichteten Abschaltung unter Setzen eines Flags. Spannungseinbrüche > 1 s werden als Ausschalten erkannt und behandelt, d. h. das HLG wird in einen sicheren Zustand überführt.

Bei Überspannung (> 32 V) erfolgt die Zerstörung einer internen Schmelzsicherung. Der folgende Spannungseinbruch wird analog einem Ausschalten behandelt.

ad 2)

Zur Überwachung der Spannung (Unterspannung) wird beim Einsatz von Sicherheitsbausteinen (z. B. Sicherheitsrelais) typischerweise ein Modul zur permanenten Messung der Spannung eingesetzt (z. B. Grenzwertschalter, redundante Anordnung). Die Ausgänge der redundanten Grenzwertschalter werden auf die sicheren Eingänge des/der Sicherheitsbausteine/s gelegt.
Zum Schutz/zur Überwachung der Überspannung kann ein Modul (z. B. Zenerdiode oder Varistor in Kombination mit einer Schmelzsicherung) eingesetzt werden. Die Anordnung der Überspannungsschutzeinheit muss direkt nach der Einspeisung erfolgen (z. B. hinter dem Netzteil). Das bedeutet, dass bei Überspannung die Schmelzsicherung zerstört wird, wobei die Sicherheitsbausteine den folgenden Spannungseinbruch analog einem Ausschalten behandeln (i. d. R. nach dem Ruhestromprinzip arbeiten) und das HLG in einen sicheren Zustand überführen.
Die Montage erfolgt aus Gründen der Baugröße sinnvollerweise nicht im HLG sondern in der Steuerbox.

5.2.2.7 Sicherheitsbezogene Parameter (Parametrisierung)

Anders als bei Lasergeräten für Medizinanwendungen, bei denen in der Norm DIN EN 60601-2-22: „Medizinische elektrische Geräte - Teil 2-22: Besondere Festlegungen für die Sicherheit einschließlich der wesentlichen Leistungsmerkmale für chirurgische, therapeutische und diagnostische Lasergeräte“ Anforderungen hinsichtlich des Schutzes gegenüber gefährdenden Ausgangswerten oder Expositionsdauern definiert sind, resultieren für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung aus den Normen DIN EN ISO 11553-1 und -2 keine diesbezüglichen Anforderungen.

So ist in der DIN EN 60601-2-22 gefordert, dass

- die angezeigte Laserstrahlung, die vom Lasergerät abgegeben wird, nicht mehr als ±20 % vom voreingestellten Wert abweichen darf;
- Lasergeräte der Klasse 3B oder 4 so konstruiert sein müssen, dass ein Erstfehler jeglicher Form nicht zu einem Anstieg der zugänglichen Strahlung von mehr als 50% über dem Nominalwert führt oder zu einer unbeabsichtigten Emission von Laserstrahlung;
- wenn die Abschaltung der Bestrahlung durch einen Zeitschalter bewirkt wird, dann der Schutz gegen den Erstfehler durch eine Sicherheitseinrichtung bewirkt werden muss, die vom Zeitschalter unabhängig ist und in Aktion tritt, sobald die eingestellte Zeitdauer um 20 % überschritten ist.

Typische Lösungsansätze zur Vermeidung derartiger Gefährdungen basieren auf Sensoren zur Laserstrahlleistungs-/Laserstrahlenergiemessung, bzw. Zeitmesskomponenten, die in ein Regelkreis-System als Eingabeeinheit integriert sind.

HLG und sicherheitsbezogene Parameter

Die richtige Auswahl und Einstellung der für eine bestimmte Anwendung erforderlichen Prozessparameter obliegt typischerweise dem HLG-Bediener [ORL06].

Sollten sich für eine bestimmte HLG-Anwendung aufgrund der Gefährdungsanalyse und der Risikobeurteilung Anforderungen hinsichtlich eines Schutzes vor gefährlichen Ausgangswerten und Expositionsdauern ergeben, so sind entsprechende Schutzmaßnahmen konstruktiv vorzusehen.

Da HLG überwiegend mit Laserstrahlung im Nahinfrarot-Bereich (NIR) betrieben werden, kann mit Hilfe von klein bauenden und zumeist kostengünstigen Detektoren (Halbleiter) z. B. die im HLG vor der letzten strahlformenden Optik propagierende Laserstrahlung gemessen werden; typischerweise wird hierzu mit einem optischen Element ein bestimmter Anteil der Strahlung auf den Detektor/die Detektoren abgelenkt. Die analogen Signale der Detektoren müssen entsprechend verarbeitet werden.

Möglich ist der Einsatz von Grenzwertschaltern, die bei Abweichung von Sollwerten in Verbindung mit der Sicherheitssteuerung eine Isolierung/Deaktivierung der Laserstrahlung einleiten. Alternativ können die Detektoren auch in einen geschlossenen Regelkreis eingebunden werden, der die Stellgrößen entsprechend nachregelt.

Handelt es sich um eine sicherheitsbezogene Steuerungsfunktion, so sind die aus der Risikobeurteilung resultierenden Anforderungen hinsichtlich der Steuerungskategorie bzw. der erforderlichen Performance Level zu erfüllen. Dieses ist bei der Gestaltung der Architektur des Regelkreises zu beachten.

Auch können Anforderungen an weitere Einrichtungen oder Medien hinsichtlich eines Schutzes vor gefährlichen Ausgangswerten und Lauf-/Zufuhrzeiten ergeben:

- motorische Vorschubunterstützung
- Zufuhr von Prozessgasen

Das Vorgehen zur Risikominderung entspricht im Wesentlichen dem, wie es oben für die Laserstrahlung diskutiert wurde. Eine nähere Betrachtung dieser Aspekte erfolgt im Rahmen dieses Berichtes nicht.

5.2.3 Leistungskriterien (Performance Level, Systemreaktionszeit)

Nach Konfiguration beispielhafter SRP/CS bzw. einer beispielhaften Sicherheitssteuerung für den HLG-Funktionsträger ist es das Ziel, die erreichten Leistungskriterien zu bestimmen.

a) Dieses sind zum einen die Steuerungskategorie nach DIN EN 954-1 bzw. die erreichten Performance Level (PL) nach DIN EN ISO 13849-1.
b) Zum anderen werden weitere Leistungskriterien, die für einen sicheren Umgang insbesondere von High-power HLG relevant sind, wie die Systemreaktionszeit/ Nachlaufzeit (bis zur Isolierung der Laserstrahlung) ermittelt.

ad a)

Die Beherrschung von Einfehler-Bedingungen (Anforderung der Steuerungskategorie 3 gem. DIN EN 954-1) wurde durch Analyse der einzelnen funktionalen Blöcke sowie der Gesamtarchitektur der Steuerung überprüft.

Aufgrund der diversitär redundanten Ausführung der eine bestimmte Sicherheitsfunktion ausführenden Kanäle (bei Verwendung bewährter Bauteile) sowie der Überprüfung der Signale durch eine Sicherheits-Kleinsteuerung (Kat 4 gem. DIN EN 954-1) auf Plausibilität und Gleichzeitigkeit kann diese Anforderung in Bezug auf die Eingangsseite erfüllt werden. Ausgangsseitig erfolgt die Weiterleitung der Signale über sichere Ausgänge an sichere Aktuatoren. Die verwendeten SRP/CS wurden entsprechend bewertet (Steuerungskategorie 3 oder höher).

Angemerkt werden muss, dass in einigen Fällen bezüglich der Leistungskriterien von Schnittstellen und der Steuerung externer Lasergeräte keine oder nur unzureichende Daten verfügbar sind. In Einzelfällen sollte kritisch hinterfragt werden, ob die SRP/CS bzw. die Steuerungsteile die erforderlichen Anforderungen (hier Einfehler-Sicherheit) erfüllen.

Angesichts der Ablösung der DIN EN 954-1 durch die DIN EN ISO 13849-1 und der Berücksichtigung probabilistischer Aspekte, d. h. der Ausfallwahrscheinlichkeit der SRP/CS, war es das Ziel, die erreichten Performance Level (PL) zu bestimmen.

Als Hilfsmittel wurde das Software-Tool „SISTEMA“ des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA der DGUV, vormals BGIA) in der Version von 2008 eingesetzt. Ein Beispiel für die Bestimmung des PL ist in Anhang 7 für eine sicherheitsbezogene Stoppfunktion (Laser-Stopp) gegeben. Bei dem dort betrachteten System handelt es sich um ein handgeführtes Lasergerät mit einer Zweihand-Zustimmungseinrichtung sowie taktiler (mechanisch über Federstößel) und berührungsloser (induktiv, kapazitiv oder Ultraschall) Aufsatzkontrolle.

Für jede Sicherheitsfunktion wurde für die Subsysteme versucht, die sicherheitsbezogenen Parameter zur Bestimmung des Performance Level zusammenzutragen.

Ausfallwahrscheinlichkeit

Zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit werden die drei Subsysteme (wie im Blockdiagramm in Abschnitt 4.3 dargestellt) zunächst separat betrachtet und im Anschluss zusammengeführt.

Sub 1: Das Teilsystem 1 besteht aus dem Sensor, optional aus einem nachgeschalteten Verstärkermodul und einem Grenzwertschalter/Fensterdiskriminator: Für das Subsystem wird die Ausfallwahrscheinlichkeit im Folgenden berechnet.

K1: Die Ausfallwahrscheinlichkeit der am Markt befindlichen Sicherheits-Kleinsteuerung K1 wird am Ende der Berechnung addiert (PFH: 1,27·10-8 1/h, entspricht PL=e bzw. Kat. 4 [ELAN, Protect])

Sub 2: Bei dem Subsystem 2 handelt es sich um Steuerungsteile, die Lasergeräteseitig vorgesehen bzw. installiert sind. Ihre Funktionalität ist für die sichere Isolierung der Laserstrahlung von entscheidender Bedeutung. Daher werden sie (am Beispiel) mit in die Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeit einbezogen.

Anforderungen aus der DIN EN ISO 13849-1 hinsichtlich $MTTF_d$ jedes Kanals, DC_{avg} und *CCF* sind zu beachten.

$MTTF_d$: Mean Time To Failure (dangerous) → Erwartungswerte
mittlere Zeit bis zum gefahrbringenden Ausfall

DC_{avg}: Diagnosis Coverage (average)
durchschnittlicher Diagnosedeckungsgrad
(Maß für die Wirksamkeit der Diagnose)

CCF: Common Cause Failure
Ausfall infolge gemeinsamer Ursache

Die sicherheitstechnischen Kenngrößen wurden bei den Herstellern der jeweiligen Bauteile abgefragt. Hier zeigte sich, dass für die überwiegende Anzahl der bewährten Bauteile keine diesbezüglichen Daten verfügbar waren. Dieses stellt für den Anwender mit Hinblick auf die Bestimmung des $MTTF_d$-Wertes und damit für den PL ein konkretes Problem dar.

Zu einigen Bauteilen (verschleißbehaftete elektromechanische Elemente, wie Schalter) konnte allerdings ein Lebensdauerkennwert B_{10d} übermittelt werden, aus dem der $MTTF_d$-Wert berechnet werden kann. Der B_{10d}-Lebensdauerkennwert gibt die Zeitdauer an, bei der 10 % der betrachteten Bauteile ausgefallen sind. Der als Anzahl von Zyklen angegebene B_{10d}-Wert muss hierzu in den in Jahren angegebenen $MTTF_d$-Wert umgerechnet werden (Näherungslösung):

$$MTTF_d = \frac{B_{10d}}{0{,}1 \cdot \eta_{op}} \tag{5.1}$$

mit

$$\eta_{op} = \frac{d_{op} \cdot h_{op}}{t_{zyklus}} \cdot 3600 \frac{s}{h} \tag{5.2}$$

mit

h_{op}: mittlere Betriebszeit in Stunden (h) pro Tag
d_{op}: mittlere Betriebszeit in Tagen pro Jahr
t_{zyklus}: mittlere Taktzeit (Schaltfolge des Elements) in Sekunden (s) pro Zyklus

Die Betriebszeit wird dabei auf den sogenannten T_{10d}-Wert (Zeit, bei der 10 % der betrachteten Bauteile gefährlich ausgefallen sind) begrenzt.

$$T_{10d} = \frac{B_{10d}}{\eta_{op}} \qquad \textbf{(5.3)}$$

$MTTF_d$-Werte elektronischer SRP/CS (für bewährte Bauteile wie Sensoren) wurden nur vereinzelt übermittelt. Auch Ausfallraten wie λ oder λ_d, mit Hilfe derer unter der vereinfachten Annahme, dass nur 50 % aller Ausfälle gefahrbringend sind, der $MTTF_d$ ermittelt werden kann, standen nicht zur Verfügung.

Bezüglich der induktiven Sensoren werden vom Hersteller *MTBF*-Werte (*MTBF*: Mean Time Between Failure) bereitgestellt. Diese Werte beschreiben die mittlere Zeitdauer in Stunden (h) zwischen zwei Fehlern, d. h. die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit im Gegensatz zum $MTTF_d$ (Zeit bis zum ersten Fehler).

Die Beziehung zwischen *MTBF* und *MTTF* ist die Verfügbarkeit.

$$V = \frac{MTTF}{MTBF} \qquad \textbf{(5.4)}$$

Betrachtet man die zu erwartende Betriebszeit ohne Ausfall gleichen sich *MTTF* und *MTBF*, die sich identisch berechnen, an.

In Tab. 5.4 sind die zur Verfügung stehenden Daten zum Zeitpunkt der Abarbeitung des entsprechenden Arbeitspaketes angegeben.

Aufgrund der geringen Anzahl an Eingangsdaten zum Zeitpunkt der Erhebung wurde die Bewertung der Leistungskriterien nur anhand der DIN EN 954-1 vorgenommen (Steuerungskategorie).

Tab. 5.4 Von den Herstellern angegebene Daten

Vom Hersteller angegebene Daten		
❍ Sensoren:	$MTTF_d$ [Jahren]	$MTTF_d$ [Stunden]
Balluf		
Induktive Sensoren: BES 516-3005-G-E4-C-PU-02 -PNP	1.200 (*MTBF*)	
Induktive Sensoren: BES 516-3006-G-E4-C-PU-02 -NPN	1.200 (*MTBF*)	
Kapazitive Sensoren: SK-1-M5-B-VA/PTFE	x	
Sensorverstärker kapazitiv: SV-45/30/5-PS	x	
Knitterswitch		
Mechanischer Schalter: MPA 206R	x	
Baumer		
Ultraschallsensor: UNDK 10P8914	100,9	883.983
Disynet		
MEMS kapazitiver Beschleunigungsaufnehmer: DA 3102-002g	x	
HY-Line		
MEMS Lagesensor: SCA 121T-D03	x	
TOPAS		
Zweiachsiges Gyroskop mit Evaluation–Board: IDG-300EVB	x	
EAO/IDEC		
Zustimmungsschalter: HE1G-21SM	100.000 (B_{10d})	

ad b)

Entscheidend für einen sicheren Umgang insbesondere mit High-Power HLG ist eine möglichst schnelle Isolierung/Deaktivierung der gefahrbringenden Laserstrahlung. Die Zeit von der Einleitung einer Isolierung bis zur tatsächlichen Isolierung (z. B. Schließen des Strahlverschlusses) ist die so genannte Nachlaufzeit oder Systemreaktionszeit. Um Gesundheitsschäden zu vermeiden, muss sie kürzer als die maximal zulässige Expositionsdauer sein (entsprechende Werte siehe Abschnitt 3).

Die Systemreaktionszeit der Gesamtsteuerung (Sensor, Logikeinheit, Aktuator) kann theoretisch durch Addition bekannter Signalantwortzeiten der Sensoren, der Systemreaktionszeit der Logiksteuerung (PLC), der Aktuatoren sowie weiterer Elemente in der Funktionskette bestimmt werden.

Eine Validierung der Gesamt-Systemreaktionszeit im Praxistest sei aber auf jeden Fall angeraten (siehe auch DIN EN ISO 13849-2).

5.3 Prüfanordnungen

Zur Qualifizierung der verwendeten SRP/CS wurden verschiedene Prüfanordnungen erstellt, mit denen jeweils bestimmte Eigenschaften der Bauteile untersucht werden können. Die entsprechenden Prüfanordnungen sind in den folgenden Unterabschnitten beschrieben.

5.3.1 Prüfaufbau zur Qualifizierung von Lage und Beschleunigungssensoren

Der in Abb. 5.4 und Abb. 5.5 dargestellte Prüfaufbau ermöglicht eine Prüfung des Signalverhaltens der ausgewählten Sensoren durch definiertes Bewegen des HLG.

Folgende Parameter können überprüft werden.

1) Verkippen des HLG zur Überprüfung des Ausgangssignals der Lage-/Beschleunigungssensoren

- MEMS-Inclinometer
- MEMS-Beschleunigungssensor
- MEMS-Gyroskop

2) Aufsetzen/Abheben des HLG zur Überprüfung der Auflagesensoren

- berührungslos:
  - induktiv
  - kapazitiv
  - Ultraschall
- berührend:
  - Rollenstößel mit Schalter
  - Rollenstößel mit induktivem Sensor

Das Signalverhalten der digitalen/analogen Ausgänge der Sensoren wurde mittels eines Speicheroszilloskopes (Tektronix, Typ TDS 744 A) aufgezeichnet.

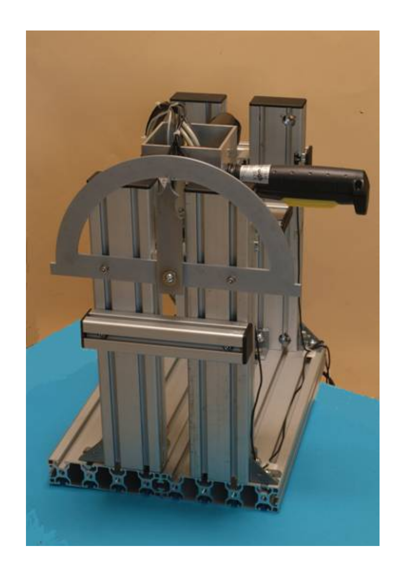




Abb. 5.4 Auf der Schwenkplatte montierter Funktionsträger

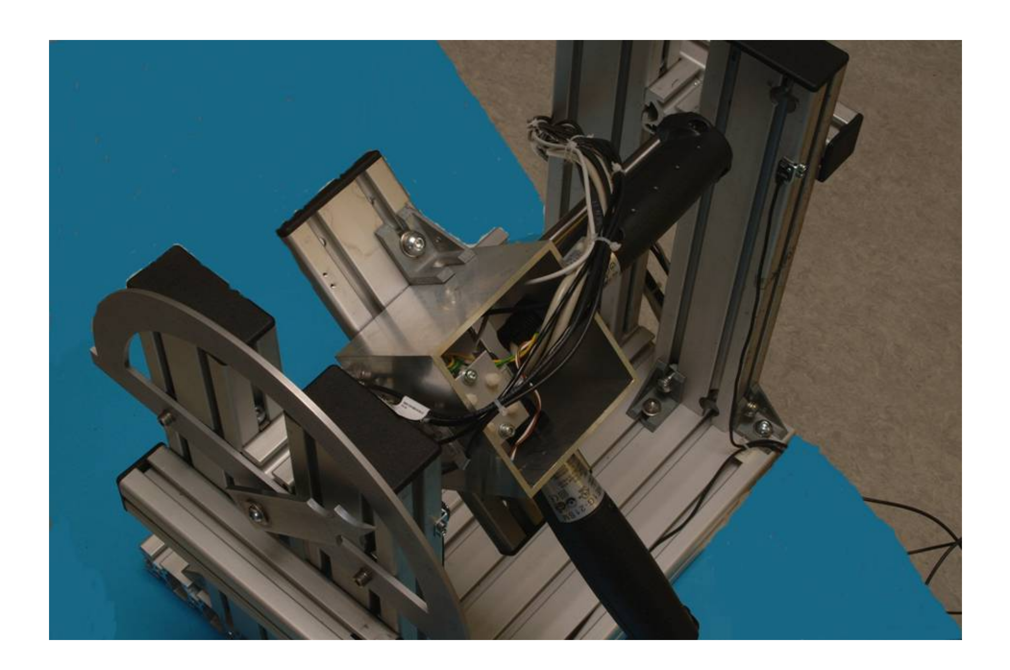


Abb. 5.5 Auf der Schwenkplatte montierter Funktionsträger beim Schwenken

Zusätzlich wird die Signallaufzeit gemessen. Die Signallaufzeit ist die Zeit zwischen Ereigniseintritt (HLG wird bewegt) und Austritt des Signals aus einem funktionalen Block der Steuerung. Um die Signallaufzeit zu ermitteln, wird das Signal mittels Speicheroszilloskop und/oder Echtzeitchronometer (Eigenbau) nach verschiedenen funktionalen Blöcken der Steuerung abgegriffen:

- direkt nach dem Sensor (z. B. nach B1)
- am Ausgang der sicheren SPS (nach K1)
- am Schaltausgang eines der sicheren SPS nachgeschalteten Sicherheitsrelais (Lasergeräteseitig, z. B. nach Q1).

Als Triggersignal (Startsignal) wird entweder das Signal einer Kontaktnadel (Abheben des HLG vom Werkstück) oder zur Prüfung von Lage- und Beschleunigungssensoren das Signal einer Lichtschranke (SUNX, EX-11B-PN), jeweils mit konstanter bekannter Signalverzögerung, verwendet.

Zur statistischen Absicherung der Messungen erfolgten jeweils 10 Wiederholungsmessungen.

5.3.2 Prüfanordnung zur Qualifizierung von Auflagesensoren sowie Lage-/ Beschleunigungssensoren in der Praxisanwendung (Warzenblech)

Zur Qualifizierung des Ansprech- und Signalverhaltens ausgewählter Sensoren in der praktischen Anwendung, wurde der Funktionsträger über verschiedene Werkstücke bewegt:

- ebenes Stahlblech,
- ebenes Aluminiumblech,
- Aluminium-Warzenblech mit einer Warzenhöhe von ca. 1 mm.

Durch die Versuche können folgende praxisrelevante Eigenschaften der Sensoren überprüft werden:

- Einfluss von Oberflächentexturen, Oberflächenanhaftungen (Schweißspritzer) auf das Schaltverhalten verschiedener berührungsloser Sensoren,
- Einfluss der Suszeptibilität des zu bearbeitenden Werkstücks bzw. Werkstoffs auf das Schaltverhalten induktiver Sensoren,
- Einfluss von Umgebungsbedingungen (u. a. Feuchte, verschmutzte Bleche, und metallische Pulver beim Laser-Pulver-Auftragschweißen) auf das Schaltverhalten berührungsloser Sensoren (insbesondere kapazitive Sensoren) und mechanischer berührender Sensoren,
- Einfluss von Störungen im Vorschub (u. a. Verhaken, Lösen) und ihre Auswirkungen auf das Signalverhalten von Lage- und Beschleunigungssensoren.

Die Signale werden mit einem Messwerterfassungssystem der Firma Agilent Technologies, Typ 34970A, erfasst und für die Auswertung an einen PC übermittelt. In der folgenden Abb. 5.6 ist die Versuchsanordnung dargestellt.

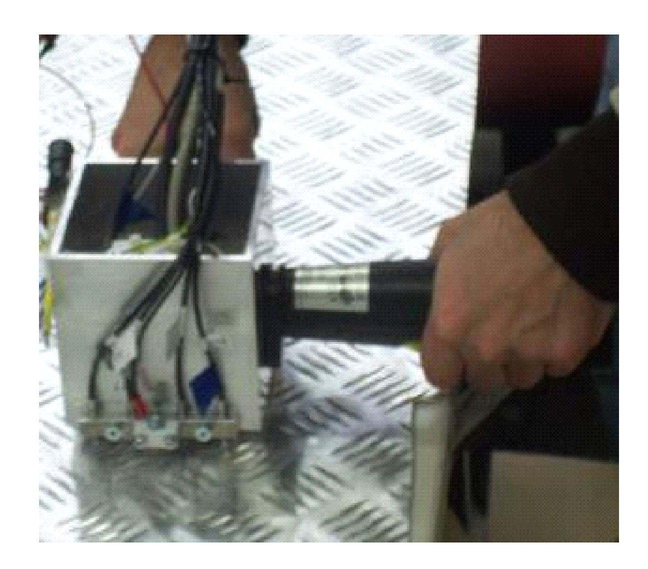


Abb. 5.6 Versuchsaufbau zur Qualifizierung von Sensoren zur Positions-/Auflagekontrolle sowie zur Lage-/Beschleunigungskontrolle

Ergänzend wurden Versuche durchgeführt, um ein Abrutschen des HLG vom Werkstück oder das Kippen um eine Werkstückkante zu simulieren. Ziel dieser Untersuchungen ist die Beantwortung von Fragen zum Signalverhalten der Lage- und Beschleunigungssensoren und zur Definition möglicher Grenzwerte für die Einleitung einer Laserstrahlisolierung. In Abb. 5.7 ist beispielhaft ein derartiger Versuch dargestellt.



Abb. 5.7 Versuchsaufbau zur Qualifizierung von Sensoren zur Lage-/ Beschleunigungskontrolle in der Praxisanwendung

5.3.3 Prüfanordnung zur Qualifizierung von ausgewählten Sensoren bei der Lasermaterialbearbeitung

Sensoren, die in HLG integriert werden, dürfen keine Querempfindlichkeiten auf den Laserstrahl sowie alle mit dem Lasermaterialbearbeitungsprozess verbundenen Bedingungen in der Prozesszone (Wärmestrahlung, Prozessgase, Schall, Rauche) aufweisen.

Um dieses zu überprüfen, wurde der Versuchsträger wie in Abb. 5.8 dargestellt an verschiedene Lasergeräte (cw sowie gepulster Bearbeitungsmodus) bzw. -bearbeitungsköpfe adaptiert. Die für den Lasermaterialbearbeitungsprozess erforderlichen Bedingungen (u. a. Parametersätze, Prozessgaszufuhr, Erfassung von Schadstoffen) wurden entsprechend eingestellt. Der HLG-Funktionsträger wird für die Versuche manuell bewegt, um Sensorsignale zu produzieren.

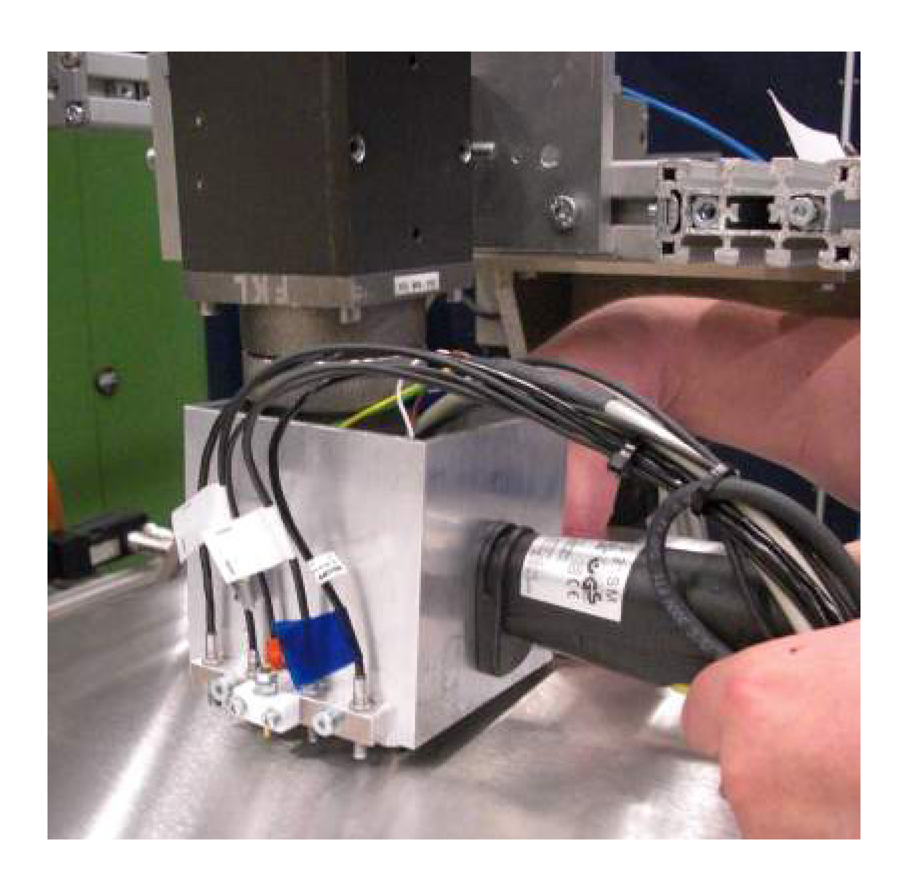


Abb. 5.8 Versuchsaufbau zur Qualifizierung ausgewählter Sensoren bei der Lasermaterialbearbeitung

Anhand des Signalverhaltens der Sensoren wurden mögliche Querempfindlichkeiten beurteilt. Die Ergebnisse werden in einer Matrix (geeignet, nicht geeignet) aufgelistet.

5.3.4 Prüfanordnung zur Qualifizierung von Sensoren zur Überwachung der Strahlführung

HLG verfügen über Strahlführungs- und -formungselemente. Bei Dejustage von optischen Elementen kann der Laserstrahl Abschirmungswerkstoffe streifen und wird in Abhängigkeit der optischen Eigenschaften der Werkstoffe absorbiert. Dieses kann zu erhöhten Temperatur von HLG-Gehäuseteilen führen oder sogar zu deren Versagen mit nachfolgendem Austritt von gefährlicher Laserstrahlung.
Zumeist werden aus ergonomischen Gründen (Baugröße, Gewicht) bei HLG Abschirmungen eingesetzt, deren passive Laserresistenz als eher gering einzustufen ist. Aus diesem Grund werden aktive Überwachungen, die eine mögliche Temperaturerhöhung von Abschirmungsbauteilen detektieren und in Verbindung mit der Sicherheitssteuerung eine Isolierung der Laserstrahlung einleiten, hinsichtlich ihres Signalverhaltens qualifiziert.

Verschiedene Abschirmungen sind Gegenstand der Betrachtung:
- Aluminium (Oberfläche wie Al-Halbzeug),
- Aluminium (Oberfläche schwarz lackiert),
- Polymer (PE grau)

Variiert werden die Winkel- und die Fokuslage des Laserstrahls zu der entsprechenden Abschirmung.



Abb. 5.9 Versuchsaufbau zur Qualifizierung ausgewählter Sensoren zur Überwachung der Strahlführung

Untersucht wird das Signalverhalten verschiedener Sensoren (PT 100 sowie Thermocouple). Die Signale der Sensoren werden mit einem Messwerterfassungssystem der Firma Agilent Technologies, Typ 34970A, erfasst und auf einen PC gegeben. Zusätzlich wird mit einem Powermeter die durch die Strahlabschirmungskomponente durchgeleitete Laserstrahlung gemessen, um indirekt Aussagen über die von der Abschirmung absorbierten Strahlungsanteile zu erlangen.

Anhand der Versuche soll die Eignung verschiedener Sensoren und ihres Signalverhaltens festgestellt werden; daneben gilt es Rückschlüsse hinsichtlich der Definition möglicher Grenzwerte für die Einleitung einer Laserstrahlisolierung zu gewinnen.

Die folgenden Abbildungen stellen den Versuchsaufbau dar.





Abb. 5.10 Versuchsaufbau zur Qualifizierung ausgewählter Sensoren zur Überwachung der Strahlführung (Einfluss der Winkellage)

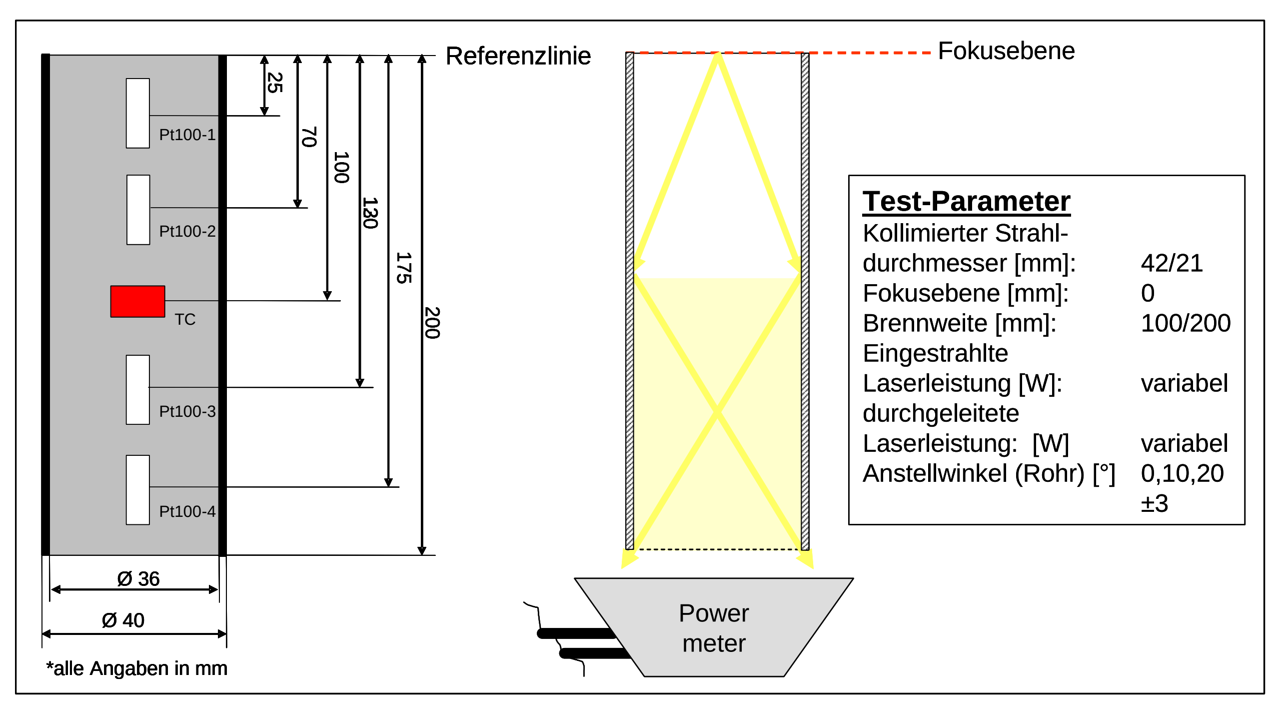


Abb. 5.11 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Qualifizierung ausgewählter Sensoren zur Überwachung der Strahlführung

6 Ergebnisse der Untersuchungen

6.1 Qualifizierung der Sensoren anhand des Signalverhaltens

Dieser Abschnitt beinhaltet die Ergebnisse der Analyse des Signalverhaltens ausgewählter Sensoren und weiterer SRP/CS (vgl. dazu auch Anhang 5).

Signalverhalten

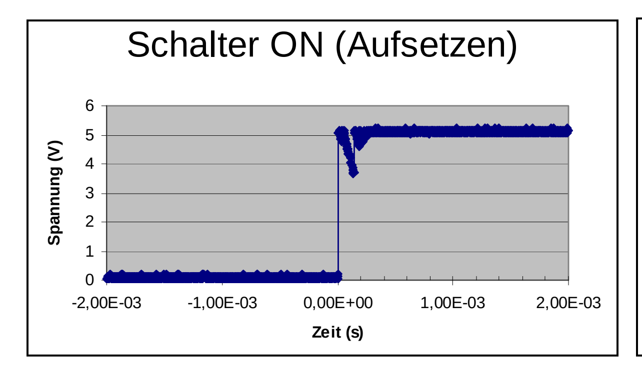
Generell kann festgestellt werden, dass die untersuchten Bauteile wie
- mechanischer Schalter
- kapazitiver Sensor
- induktiver Sensor
- Ultraschallsensor

eine Sprungantwort (Spannung: high/low) liefern.

Die Anstiegszeit beträgt in allen Fällen weniger als 10^{-3} s (1 ms), zum Teil deutlich weniger (10 µs).

6.1.1 Mechanischer Taster

Das Signalantwortverhalten des stößelbetätigten mechanischen Tasters ist in Abb. 6.1 wiedergegeben.



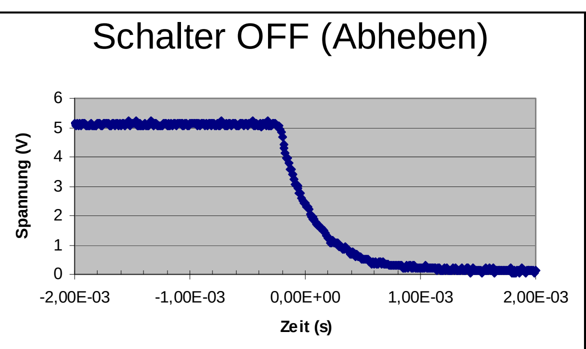


Abb. 6.1 Antwortsignale des Tasters (Stößel)

Das Prellen des mechanischen Tasters stellt insofern kein Problem dar, weil die erste Sprungantwort (Flanke) von der PLC ausgewertet wird. Beim Abheben macht sich der Einfluss der Feder (vom federbelasteten Stößel) bemerkbar. Der Stößel gleitet zeitverzögert nach unten. Hier ähnelt die ermittelte Funktion einer e-Funktion. Bis zum Erreichen des Spannungswertes „0 V“ wird ein Zeitraum von ca. 1 ms benötigt. Dieses unterstreicht, dass die Auslegung der mechanischen Komponenten bei einer Auflagekontrolle mit Stößel in die Signalantwort mit einfließt.

Die Steuerung verarbeitet dieses digitale Signal pro Zyklus (Ausführungszeit), d. h. max. innerhalb von 15 ms. Da die Signalantwort des Tasters (high/low-Pegel) die Schaltschwellen der Steuerung sicher über-/bzw. unterschreitet und die Signalantwort des Tasters in einem Zeitraum von ca. 1 ms erfolgt und damit deutlich kürzer als die Zykluszeit der Steuerung ist, ist die Zykluszeit die maßgebende Zeit für die Systemantwort der Steuerung.

6.1.2 Induktive Sensoren

Das Signalantwortverhalten aller untersuchten induktiven Sensoren (kurzer Schaltabstand: 1,5 mm, langer Schaltabstand: 6 mm, Sensor mit Reduktionsfaktor F_1=1) entspricht folgender Abb. 6.2. Die Anstiegszeiten bewegen sich im Bereich weniger µs. Dieses bedeutet, dass die Zykluszeit der Steuerung die maßgebende Zeit für die Systemantwort der Steuerung ist.

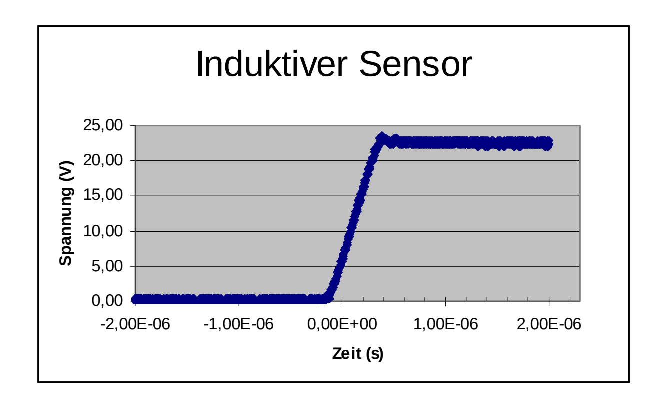


Abb. 6.2 Antwortsignal des induktiven Sensors (berührungslos)

6.1.3 Kapazitive Sensoren

Das Signalantwortverhalten der untersuchten kapazitiven Sensoren ist in Abb. 6.3 wiedergegeben. Die Anstiegszeiten bewegen sich auch hier im Bereich weniger µs. Dieses bedeutet, dass die Zykluszeit der Steuerung die maßgebende Zeit für die Systemantwort der Steuerung ist.

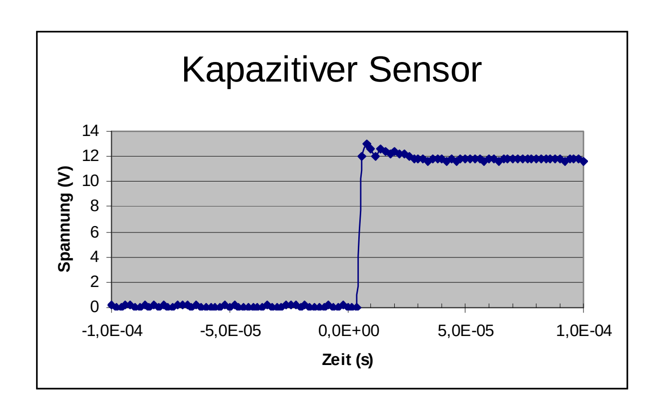


Abb. 6.3 Antwortsignal des kapazitiven Sensors (berührungslos)

6.1.4 Ultraschallsensor

Das Signalantwortverhalten des untersuchten Ultraschallsensors gibt Abb. 6.4 wieder. Auch hier liegen die Anstiegszeiten im Bereich weniger µs, so dass die Zykluszeit der Steuerung die maßgebende Zeit für die Systemantwort der Steuerung ist.

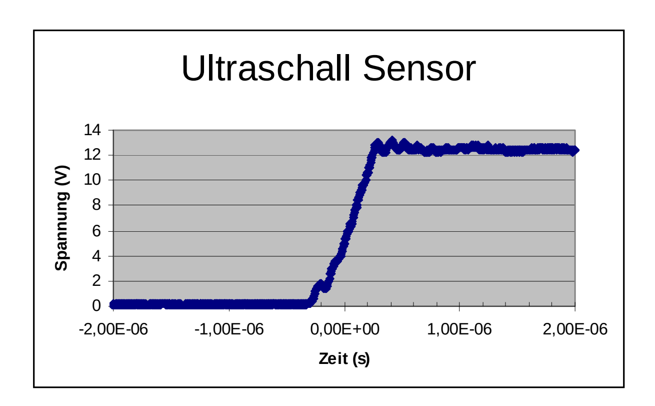


Abb. 6.4 Antwortsignal des Ultraschall-Sensors (berührungslos)

6.1.5 Lage- und Beschleunigungssensoren

Die auf der MEMS-Technologie (Mikro-Elektro-Mechanische Systeme) basierenden untersuchten Lage- und Beschleunigungssensoren liefern ein analoges Spannungssignal, das

- bei Lagesensoren proportional zum Winkel ist (Neigungssensor),
- bei Beschleunigungssensoren proportional zur Beschleunigung (lineare Beschleunigung/Winkelbeschleunigung) ist.

Mit dem in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Prüfaufbau wurde die Funktion $U = f(\alpha)$ bestimmt. In Kombination mit einem Grenzwertschalter können Grenzwerte der Lage/des Winkels für die Auslösung einer Laserstrahlisolierung in Verbindung mit der Sicherheitssteuerung definiert werden.

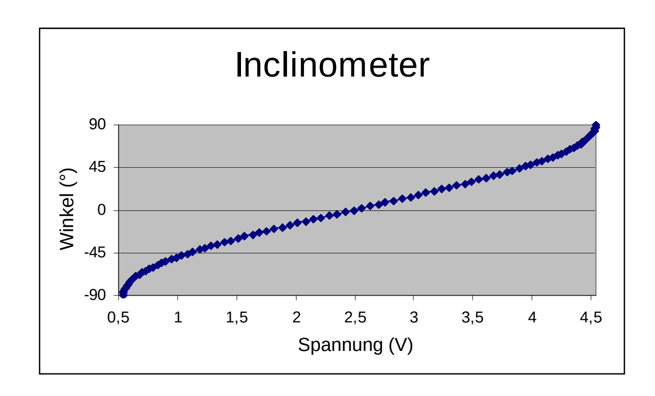
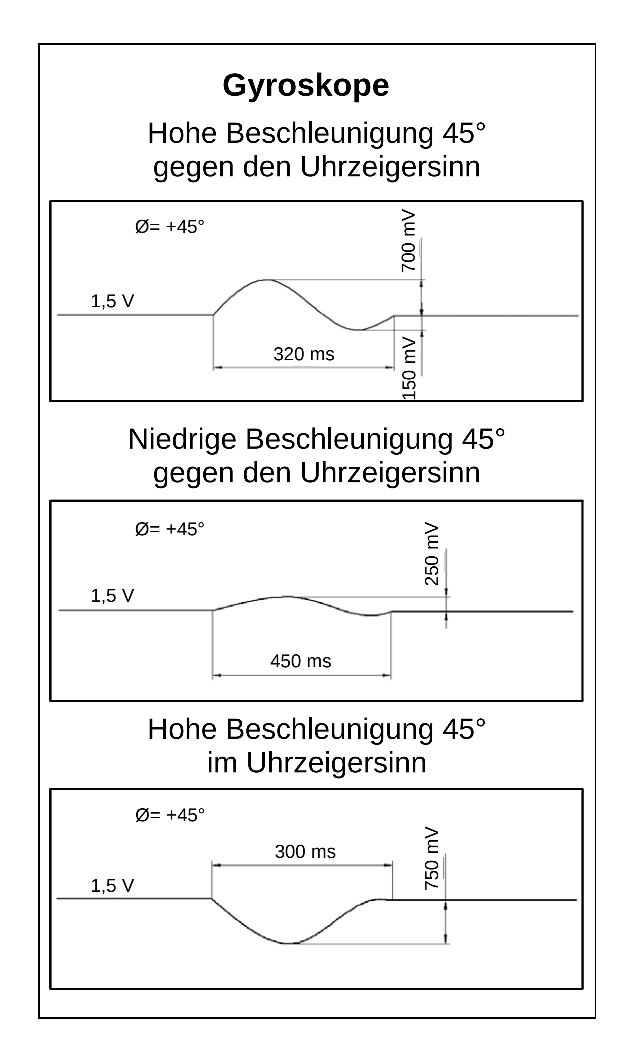


Abb. 6.5 Analoges Antwortsignal des Lagesensors

Die Gyroskope wurden ebenfalls mit dem Prüfaufbau untersucht. In den folgenden Abbildungen sind die analogen Signalfunktionen $U = f(a) = f(d\varphi/dt)$ angegeben.



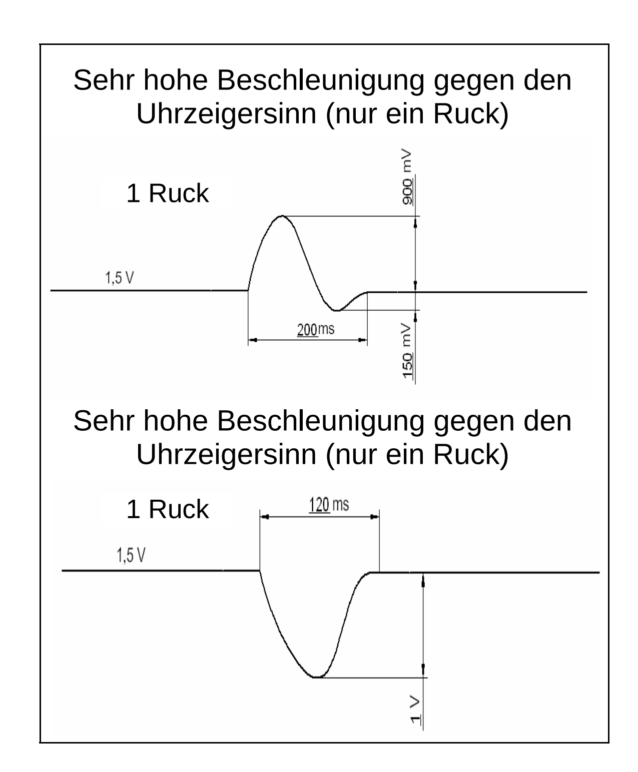


Abb. 6.6 Analoge Antwortsignale des Beschleunigungssensors (Winkelbeschleunigung) für unterschiedliche Beschleunigungen/Bewegungen mit dem HLG

Prinzipbedingt liefern die MEMS-Sensoren sowohl ein der Beschleunigung als auch ein der Neigung proportionales Signal. Je nach Auslegung des Sensors werden durch einen Filter bestimmte Anteile der Signale genutzt.

Lagesensoren sind mit einem Tiefpassfilter ausgerüstet, der die statischen Signale der Neigung passieren lässt und die dynamischen Signale einer Beschleunigung herausfiltert. Beschleunigungssensoren sind mit einem Hochpass versehen, der nur die dynamischen Signale passieren lässt.

Die analogen Antwortsignale müssen mittels Grenzwertschaltern/Fensterdiskriminatoren verarbeitet werden, sofern die Sicherheits-Kleinsteuerung nur über digitale Eingänge verfügt. Der den Sensoren nachgeschaltete Grenzwertschalter liefert ein digitales Signal (high/low) als Ausgang. Nach Kenntnis der Antwortfunktionen $U = f(\alpha)$ für Lagesensoren, sowie $U = f(dx/dt)$ für Beschleunigungssensoren bzw. $U = f(d\varphi/dt)$ für Gyroskope, werden die Grenzen entsprechend eingestellt.

6.2 Qualifizierung von Auflagesensoren sowie Lage-/ Beschleunigungssensoren in der Praxisanwendung

Im Folgenden sind die Ergebnisse zur Qualifizierung von Auflagesensoren sowie Lage- und Beschleunigungssensoren dargestellt (vgl. dazu auch Anhang 5).

6.2.1 Berührungslose Auflagesensoren

Um den Einfluss des Schaltabstandes, der Suszeptibilität des zu erkennenden Objekts (Werkstück, das mit dem HLG bearbeitet wird) und von Umgebungsbedingungen (Feuchte) zu dokumentieren, wird im Folgenden für einen ausgewählten berührungslosen kapazitiven Sensor und verschiedene induktive Sensoren und Oberflächenbedingungen das Ausgangssignal beispielhaft für einen Bewegungszyklus/Versuch dargestellt.

<u>Ebene Oberfläche</u>

Anhand der linken Seite der Abb. 6.7 ist zu erkennen, dass der induktive Sensor im Vergleich zum kapazitiven Sensor Schaltvorgänge (on/off) durchläuft. Ursächlich hierfür ist der durch einen Reduktionsfaktor von F≈0,45 nochmals verkürzte Schaltabstand des induktiven Sensors. Dieses führt bei leichten Verkippungen des HLG zu einem Schaltpunkt des induktiven Sensors.

Wird ein induktiver Sensor mit einem Reduktionsfaktor F=1 verwendet, wie auf der rechten Seite dargestellt, kann eine sichere Objekterkennung gewährleistet werden.

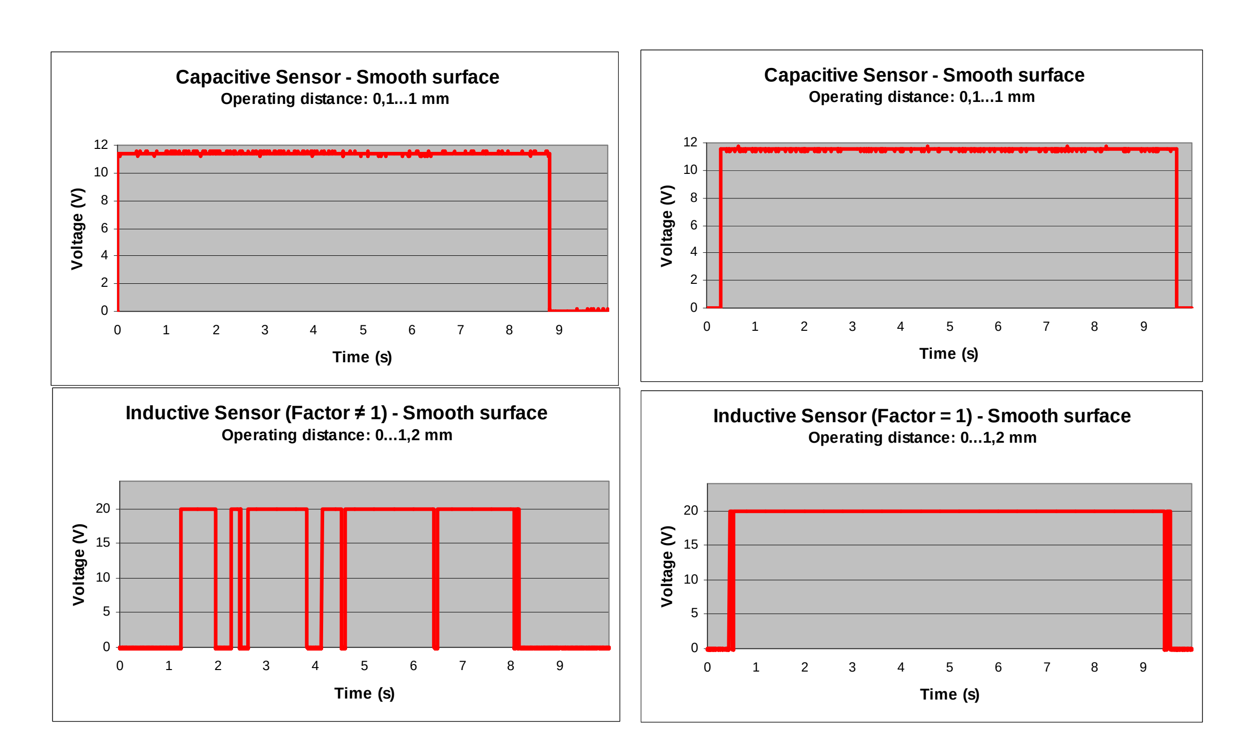


Abb. 6.7 Antwortsignale des kapazitiven Sensors im Vergleich zum induktiven Sensor für eine ebene Oberfläche eines Al-Bleches;
links: F≠1, s_n=1,2 mm, rechts: F=1, s_n=1,2 mm

Die Verwendung eines induktiven Sensors mit einem größeren Schaltabstand (gesicherter Schaltabstand s_n=4,8 mm) und einem Reduktionsfaktor F≠1 führt, wie Abb. 6.8 zeigt, ebenfalls zu einer sicheren Objekterkennung. Beachtet werden muss bei der Wahl eines Sensors mit derartigen Schaltabständen allerdings der maximal zulässige Nachlauf, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben.

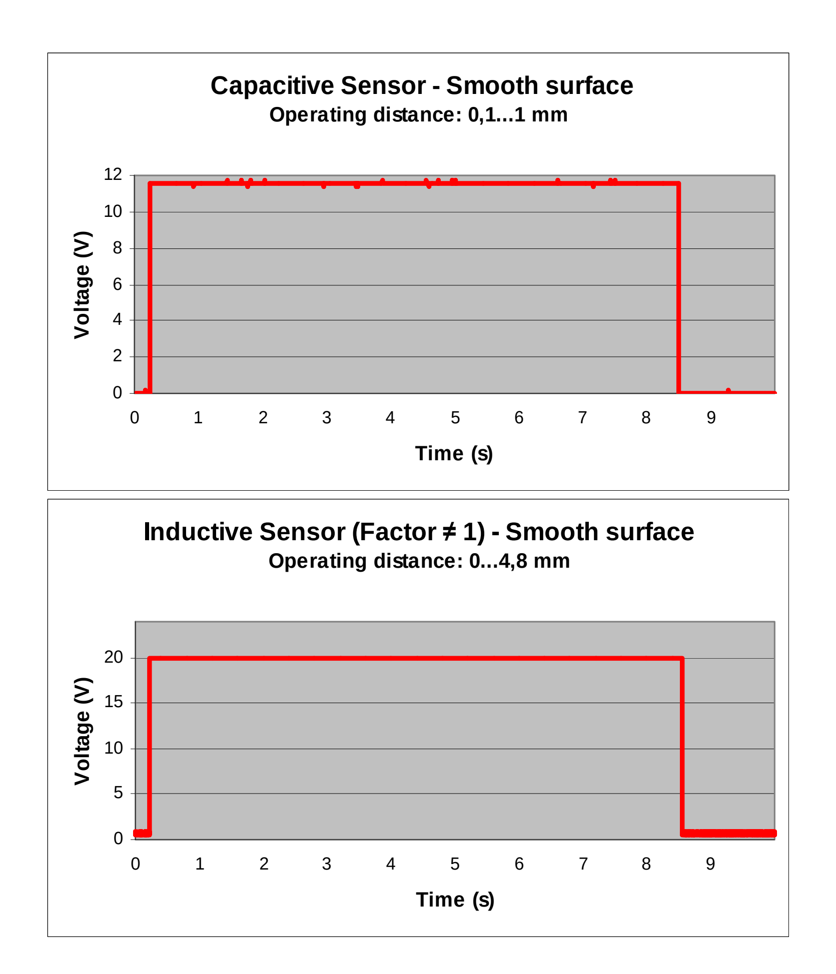


Abb. 6.8 Antwortsignale des kapazitiven Sensors im Vergleich zum induktiven Sensor für eine ebene Oberfläche eines Al-Bleches; F=1, s_n=4,8 mm

Warzenblech-Oberfläche

Bei einer Oberfläche mit Erhöhungen oder Materialanhaftungen im mm-Bereich erhält man signifikantere Ergebnisse. Bei Verwendung eines induktiven Sensors mit einem Reduktionsfaktor F≠1 und einem Schaltabstand von s_n=1,2 mm reagiert der induktive Sensor durch Schaltvorgänge (on/off). Selbst bei Verwendung eines induktiven Sensors mit einem Reduktionsfaktor von F=1 und s_n=1,2 mm ist keine sichere Objekterkennung bzw. Lagetoleranz gewährleistet. Dieses kann erst mit einem Sensor mit einem Schaltabstand von s_n=4,8 mm erreicht werden, wie in Abb. 6.10 dargestellt ist (auf die Problematik des maximal zulässigen Nachlaufs sei verwiesen).

Festzustellen ist, dass es in Einzelfällen einer absichtlichen Verkippung auch bei dem kapazitiven Sensor zu Schaltvorgängen kommen kann. In der Gegenüberstellung zu vergleichbaren induktiven Sensoren bietet der ausgewählte kapazitive Sensor bei den realisierten Versuchsparametern eine bessere Praxiseignung.

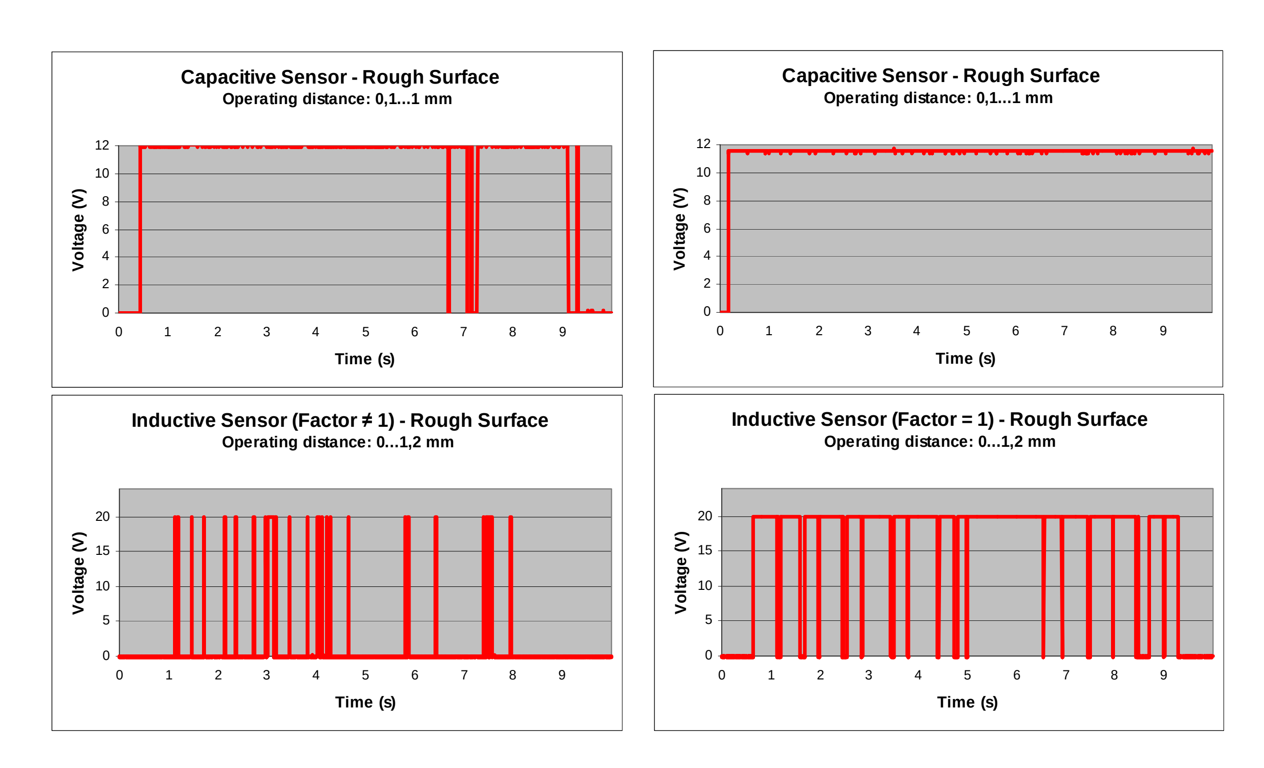


Abb. 6.9 Antwortsignale des kapazitiven Sensors im Vergleich zum induktiven Sensor für eine Warzenblech-Oberfläche eines Al-Bleches; (links: F≠1, s_n=1,2 mm, rechts: F=1, s_n=1,2 mm)

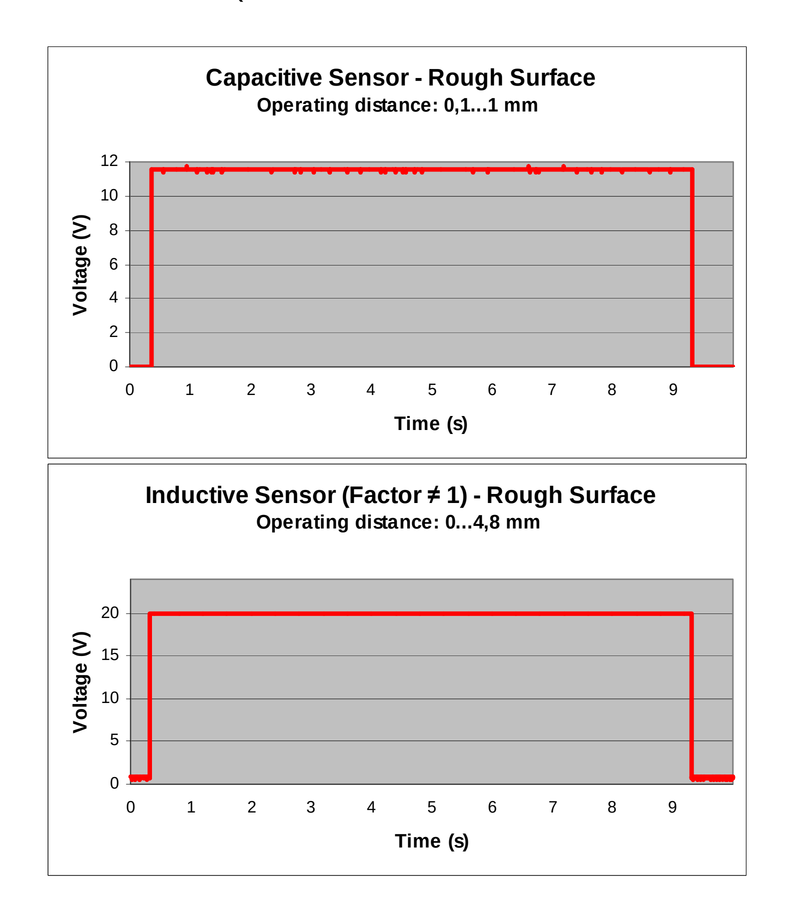


Abb. 6.10 Antwortsignale des kapazitiven Sensors im Vergleich zum induktiven Sensor (F≠1, s_n=4,8 mm)

Mit Wasser benetzte Oberfläche und kapazitiver Sensor

Zur Untersuchung der Querempfindlichkeiten auf Umgebungsbedingungen wurde das Schaltverhalten des kapazitiven Sensors bei der Objekterkennung eines mit Wasser benetzten Werkstückes überprüft.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Sensor beim Aufsetzen des HLG in den Schaltzustand „on" übergeht. Wird der Sensorkopf mit Wasser benetzt, verbleibt er auch beim Abheben des HLG von der Werkstückoberfläche im Schaltzustand „on". Hierdurch wird beim Abheben die Einleitung einer Isolierung des Laserstrahls in Verbindung mit der Sicherheitssteuerung unterbunden. Dieses stellt eine Gefährdung dar.

In der Schlussfolgerung bedeutet dieses eine eingeschränkte Tauglichkeit des kapazitiven Sensors bei mit Wasserbenetzten Werkstoffoberflächen. Der kapazitive Sensor sollte daher nur in Kombination mit Sensoren anderen Wirkprinzips in eine diversitär redundante Architektur einer Sicherheitssteuerung eingebunden werden.

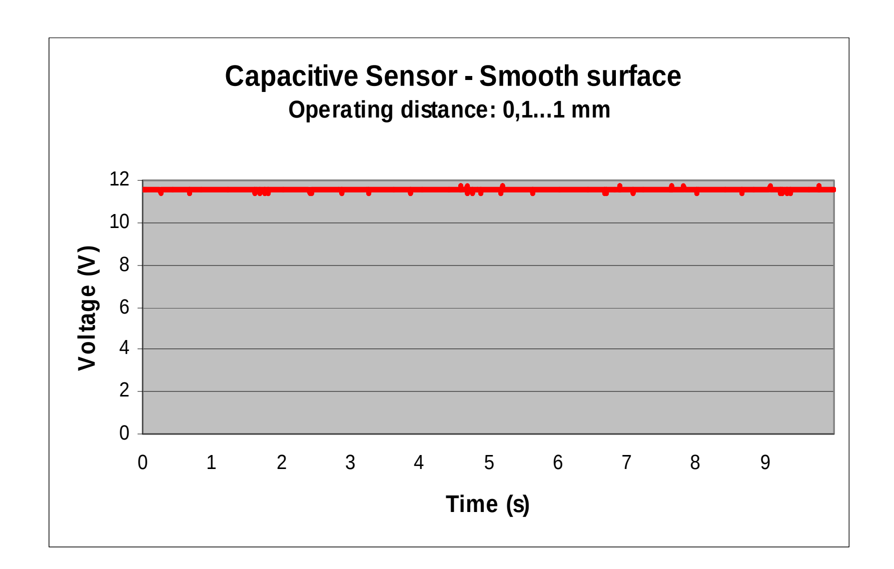


Abb. 6.11 Antwortsignale des kapazitiven Sensors bei einer mit Wasser benetzten Oberfläche

6.2.2 Beschleunigungssensoren Auflagesensoren

Im Folgenden sind ausgewählte Ergebnisse der Praxistests von Beschleunigungssensoren dargestellt.

Ziel des Einsatzes von Bescheunigungssensoren in HLG ist die Erkennung von Fehlerfällen wie Abrutschen des HLG, die eine erhöhte Beschleunigung mit sich bringen, und nachfolgend die Einleitung einer Isolierung des Laserstrahls in Verbindung mit der Sicherheitssteuerung. Ausgewählt wurde ein 3-achsiger Beschleunigungssensor, der einen Messbereich bis 2 g aufweist.

In Abb. 6.12 ist die Signalantwort des Beschleunigungssensors beim Abrutschen des HLG von der Bauteilkante dargestellt.

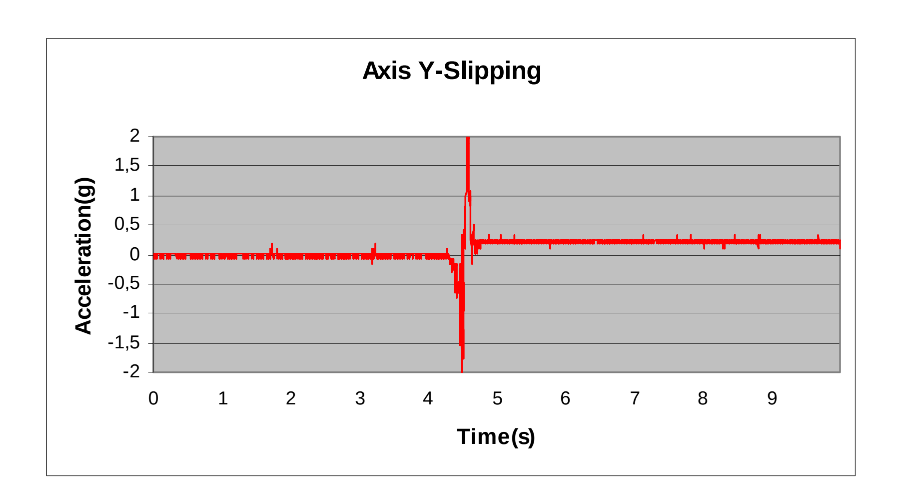


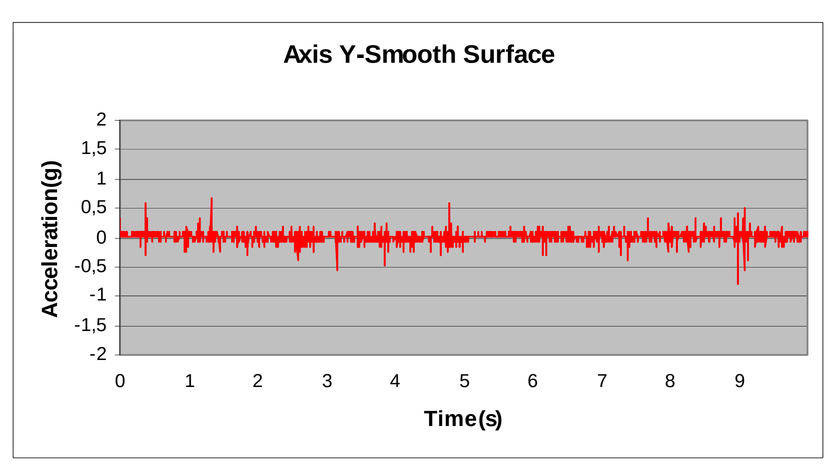
Abb. 6.12 Antwortsignal des Beschleunigungssensors beim Abrutschen des HLG von der Bauteilkante

Wie anhand dieser Abbildung zu erkennen ist, werden Signalamplituden von 2 g beim Abrutschen des HLG von der Bauteilkante erreicht.

Vergleicht man diese Amplituden mit Beschleunigungen, wie sie im praktischen Einsatz von HLG auftreten können, erkennt man, dass diese Amplituden insbesondere bei rauen Oberflächen, oder Oberflächen mit Werkstückanhaftungen durch Vorgänge wie „Verhaken“ und „Lösen“ auch erreicht werden können.

Während bei der Bearbeitung von glatten ebenen Oberflächen ein ausreichendes Signalverhältnis zwischen bestimmungsgemäßem Betrieb und Fehlerbedingung (Abrutschen) besteht, ist bei der Bearbeitung von Werkstücken mit möglichen Oberflächenanhaftungen eine Problematik bei der Definition von Werten für die Grenzwertschalter oder Fensterdiskriminatoren gegeben, bei denen eine Einleitung der Laserstrahlisolierung erfolgt.

Vergleichbares gilt auch für die untersuchten Gyroskope.



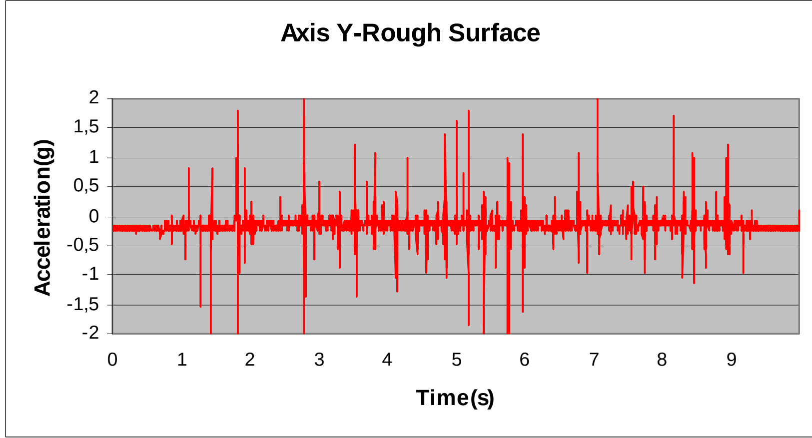


Abb. 6.13 Antwortsignal des Beschleunigungssensors beim Bewegen des HLG über eine glatte ebene Oberfläche (oben) und über eine Oberfläche mit Werkstückanhaftungen (unten)

6.3 Qualifizierung von ausgewählten Sensoren bei der Lasermaterialbearbeitung

Die in den Funktionsträger eingebauten Sensoren wurden in experimentellen Untersuchungen auf ihre Praxistauglichkeit überprüft (vgl. dazu auch Anhang 5). Dieses erfolgte

a) ohne Laserprozess gemäß den Abschnitten 6.2

Der Versuchsträger (vgl. Abschnitt 5.1) wurde auf verschiedene Werkstücke aufgesetzt oder frei geführt. Nachgestellt wurden Applikationen aus der Praxis, u. a. mit verschmutzten Blechen und metallischen Pulvern (Laser-Pulver-Auftragschweißen).

b) mit Laserprozess.

Der Versuchsträger (vgl. Abschnitt 5.1) wurde an verschiedene Laserbearbeitungsköpfe (Betriebsarten: cw, pm) adaptiert, so dass Einflüsse des Bearbeitungsprozesses (Laserstrahlung, Wärmestrahlung, Prozessgase, Schall, Rauche) auf die Sensoren (Objekterkennung) untersucht werden konnten. Der HLG-Funktionsträger wurde dabei manuell bewegt, um Sensorsignale zu produzieren.

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit Laserstrahlung und die dabei festgestellten Einsatzgrenzen und Querempfindlichkeiten sind für die gängigsten Sensortypen (Auflagekontrolle sowie Lage- und Beschleunigungskontrolle) qualitativ in den folgenden Tabellen zusammengefasst. Zu erwähnen sind hier insbesondere die Empfindlichkeit der kapazitiven Sensoren gegenüber Feuchtigkeit sowie die Störung der Funktionalität der Ultraschallsensoren durch Gase und Gasturbulenzen im Bereich der Messstrecke. Durch diese Effekte wird die Einsetzbarkeit der betreffenden Sensoren eingeschränkt. Die Ergebnisse fließen in die Bewertung der Sensoren im Hinblick auf ihre Eignung für HLG ein (siehe auch Abschnitt 7.1).

Tab. 6.1 Prüf- und Ergebnismatrix von Sensoren zur Auflagekontrolle

Bauelement **Kriterium**	Mikro-schalter	Induktiver Sensor (Stößel)	Kapazitiver Sensor (Stößel)	Induktiver Sensor	Kapazitiver Sensor	Ultraschall Sensor
Einsatz-grenzen		-nur metallische Werkstoffe -Typabhängige Schaltabstände z.T. im mm Bereich	-metallische und nichtmetallische Werkstoffe	-nur metallische Werkstoffe -Typabhängige Schaltabstände z.T. im mm Bereich	-metallische und nichtmetallische Werkstoffe	- alle Werkstoffe - rel. großer Bereich einstellbarer Schaltabstände
Querempfind-lichkeiten		Keine erkennbaren	Kaum, da gekapselt	Keine erkennbaren	Nachstellung bei Feuchtigkeit	Gase u. Gasturbulenzen im Bereich der Messtrecke
Mechanik Schaltwege Druckpunkt Andruckkraft	Prellen, Abhängig von federbelaste-tem Stößel	Abhängig von federbelaste-tem Stößel	Abhängig von federbelastetem Stößel			
Elektronik Signale Signallaufzeit Abschaltzeit	low/high im Bereich µs	low/high im Bereich µs	low/high im Bereich µs	low/high im Bereich µs	low/high im Bereich µs	low/high im Bereich µs

Tab. 6.2 Prüf- und Ergebnismatrix von Sensoren zur Lage- und Beschleunigungskontrolle

Bauelement / **Kriterium**	Lagesensor (2/3-achsig)	Beschleunigungssensor (2/3-achsig)	Gyroskop (2/3-achsig)
Einsatz-grenzen	Keine Beschränkung für HLG	Keine Beschränkung für HLG	Keine Beschränkung für HLG
Querempfind-lichkeiten	Keine erkennbaren	Keine erkennbaren	Keine erkennbaren
Lage/Beschleunigung Winkel/Signal Beschleunigung/Signal	Einfache Grenzwertfest-legung	nicht einfache Grenzwert-festlegung	nicht einfache Grenzwertfestlegung
Elektronik Signale Signallaufzeit Abschaltzeit	- analoges Signal - Verarbeitung z.B. durch Grenzwertschalter - µs-Bereich	- analoges Signal - Verarbeitung z.B. durch Grenzwertschalter - µs-Bereich	- analoges Signal - Verarbeitung z.B. durch Grenzwertschalter - µs-Bereich

6.4 Qualifizierung von Sensoren zur Überwachung der Strahlführung

Die Untersuchungen sollen Fragen zum Signalantwortverhalten verschiedener Temperatursensoren beantworten. Hieraus können konkrete Anforderungen z. B. an die Signalverarbeitung, d. h. das Signalverhältnis zwischen bestimmungsgemäßem Betrieb und Fehlerbedingungen (Alarmsignal/Normalsignal-Verhältnis) sowie daraus resultierend die Definition von Grenzwerten der Grenzwertschalter/Fensterdiskriminatoren, abgeleitet werden (vgl. dazu auch Anhang 5).

Im Folgenden werden die Ergebnisse anhand beispielhafter Einstellungen veranschaulicht. Die maximale Bestrahlungsdauer beträgt 100 s, wobei hinsichtlich der Konfiguration einer aktiven Überwachung eine maximale Zeitdauer bis 10 s von besonderem Interesse ist.

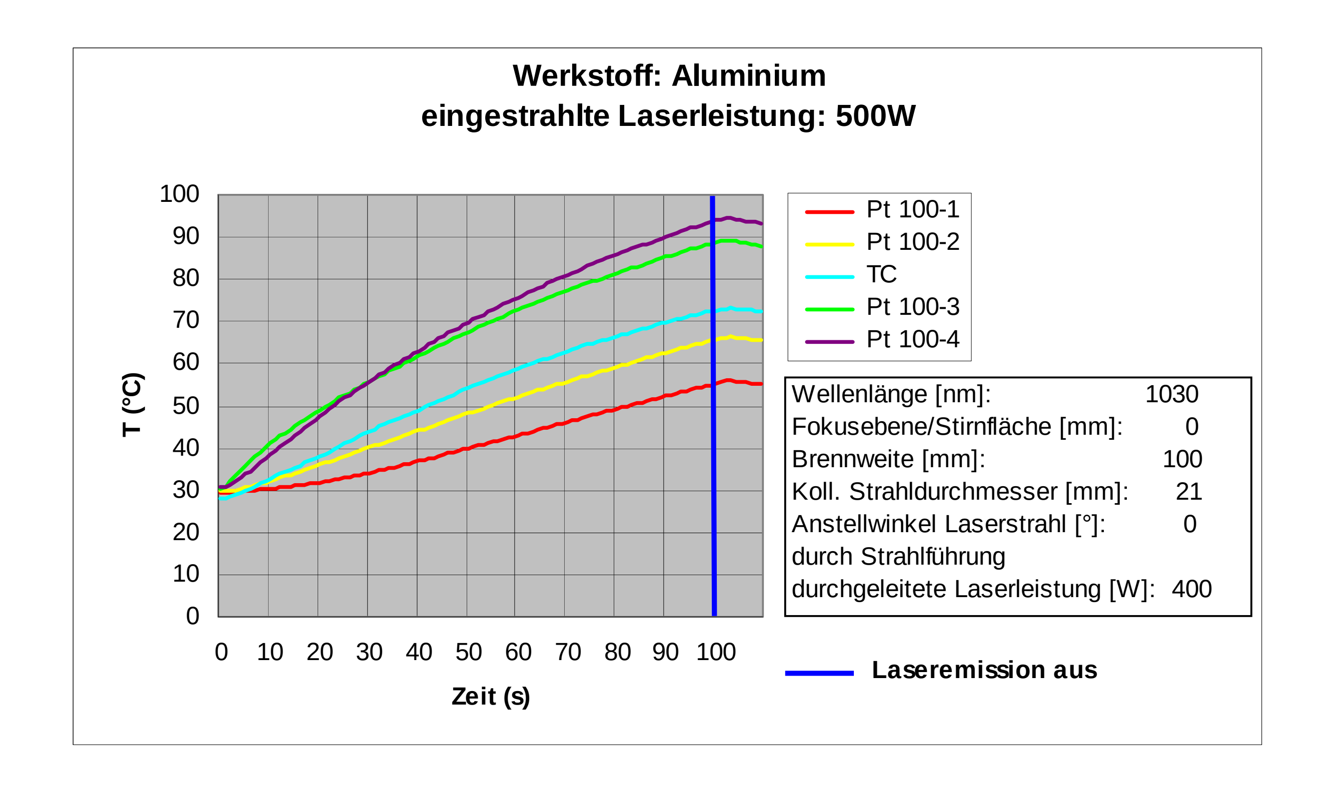


Abb. 6.14 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (eingestrahlte Leistung: 500 W, Anstellwinkel: 0°)

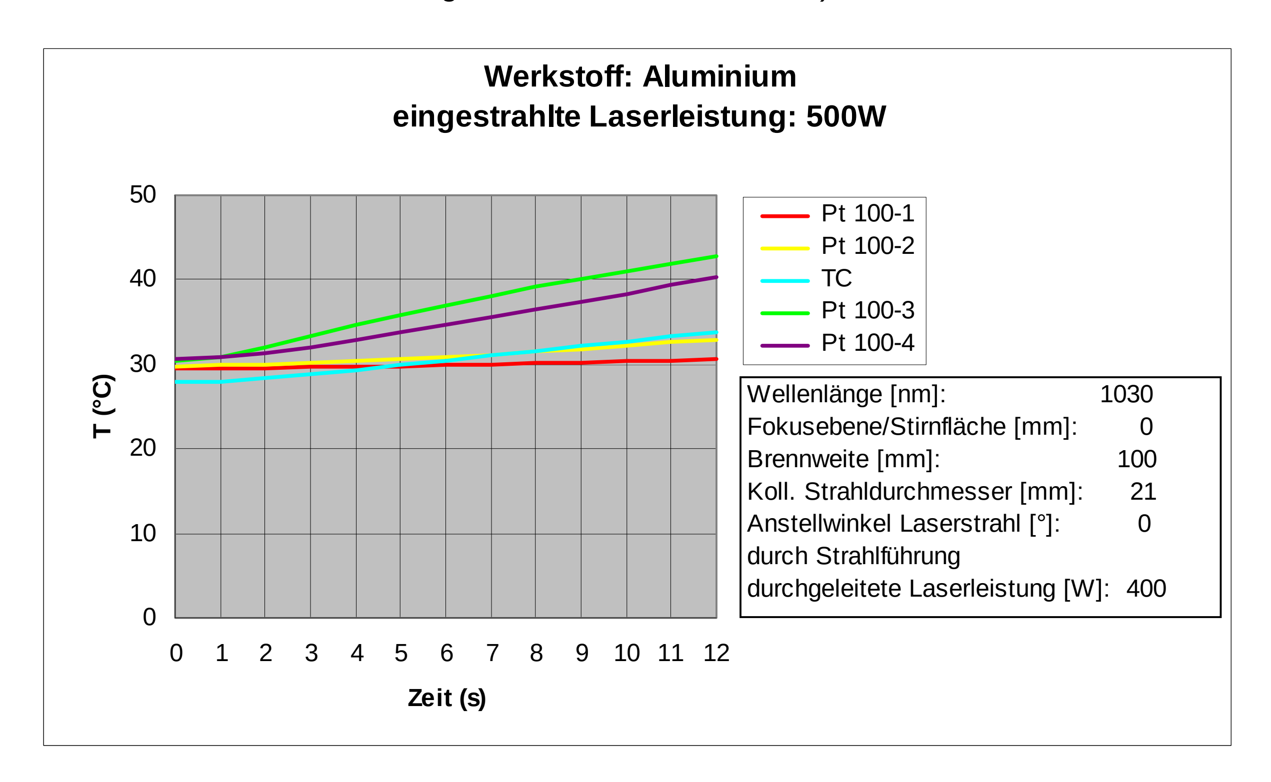


Abb. 6.15 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 500 W, Anstellwinkel: 0°)

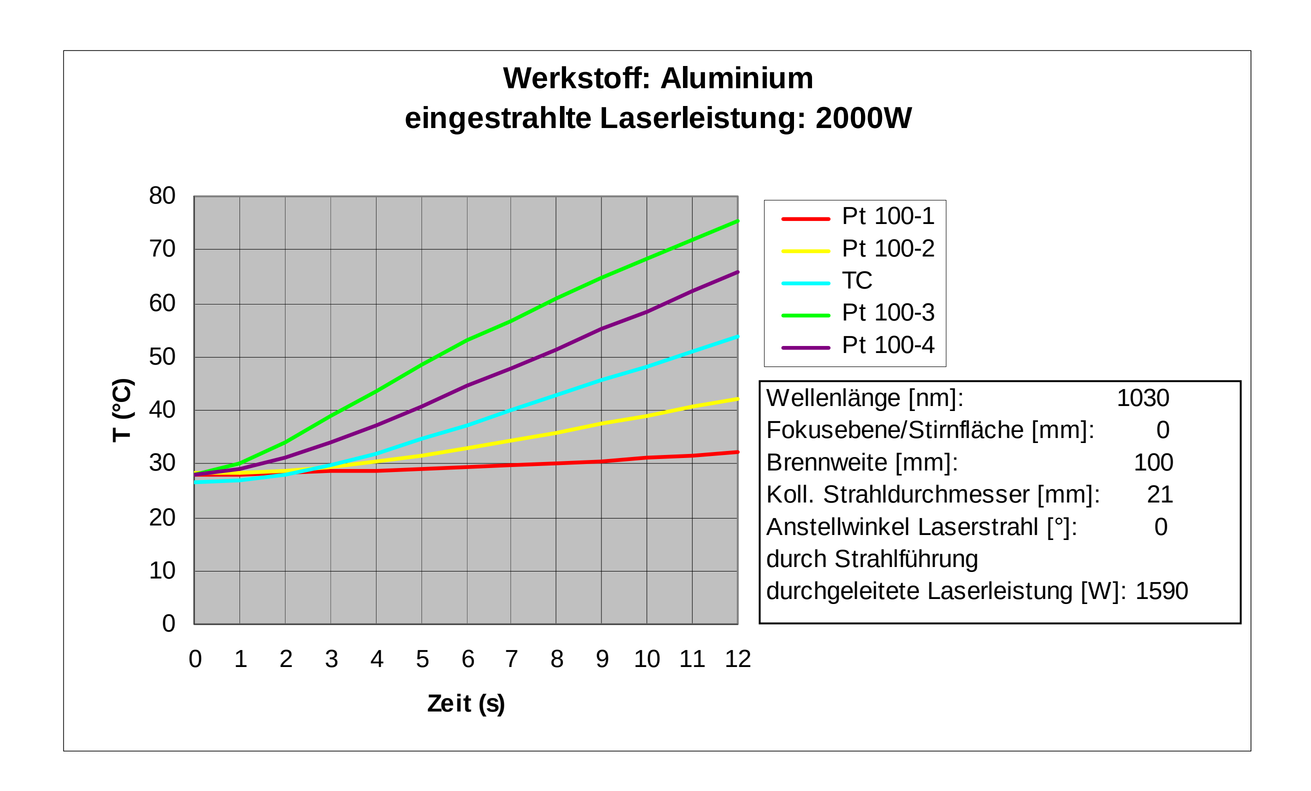


Abb. 6.16 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 2000 W, Anstellwinkel: 0°)

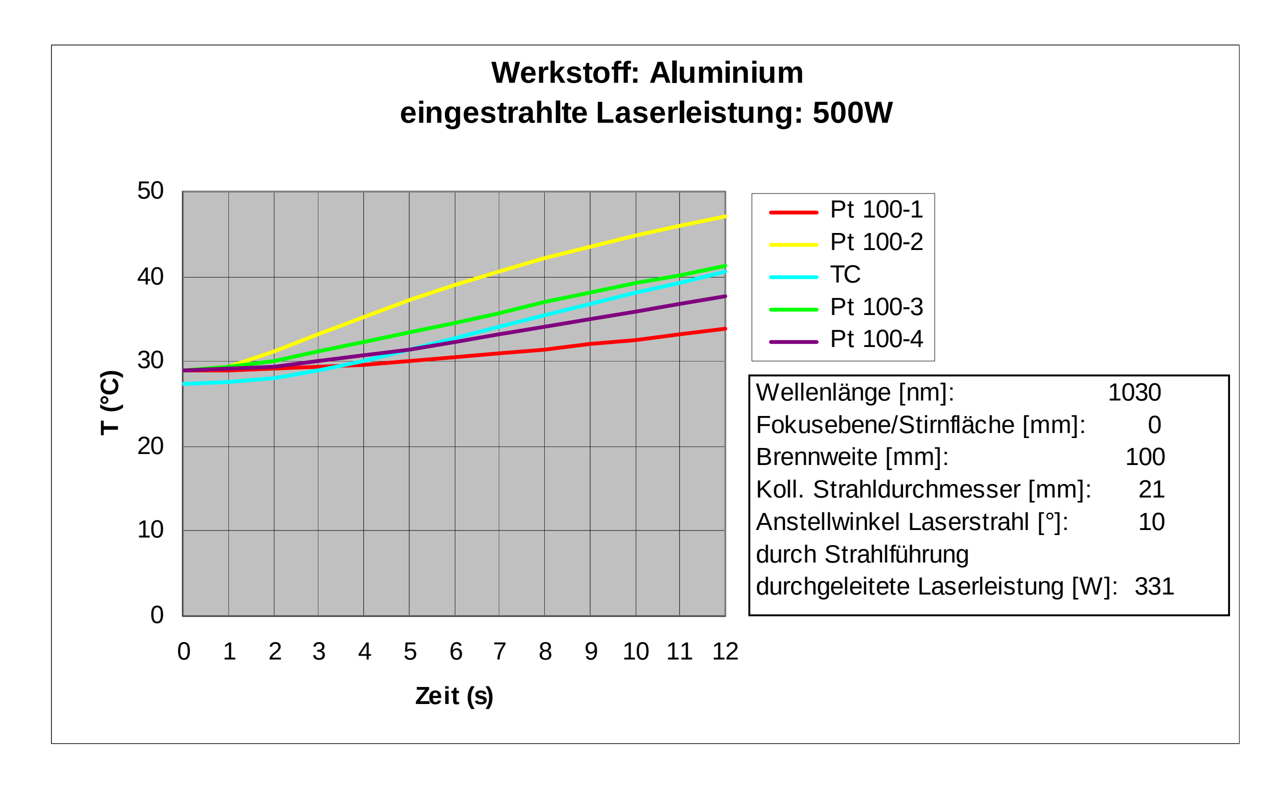


Abb. 6.17 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 500 W, Anstellwinkel: 10°)

Festgestellt werden kann, dass der Thermocouple Sensor ein trägeres Anstiegsverhalten aufweist als die PT 100 Elemente.

Wie erwartet korrespondieren die Signalantworten der Sensoren mit der sich einstellenden Temperaturverteilung in der Abschirmung. Bei Verändern des Einstrahlwinkels zur Abschirmung ergeben sich je nach Lage des einzelnen Sensors unterschiedliche Signalantworten; der Temperaturbereich, in dem sich alle Sensoren bewegen, bleibt jedoch in den ersten 10 s im Wesentlichen (±25 %) vergleichbar (siehe Abb. 6.17). Abweichungen resultieren insbesondere daraus, wenn die Sensoren nicht auf dem Umfang verteilt sind, sondern in Reihe auf der Abschirmung platziert werden, und der Strahl auf der den Sensoren zugewandten oder abgewandten Seite der Abschirmung streift.

Kollimierter Strahl

Die Versuche mit einem kollimierten Strahl mit einem Durchmesser von 21 mm verdeutlichen, dass bei einer Winkellage von 0° (keine Verkippung) für eingestrahlte Leistungen zwischen 500 W und 2000 W nur minimale Strahlungsanteile absorbiert werden, infolge dessen keine oder nur eine minimale Temperaturerhöhung (2000 W) beobachtet werden kann.

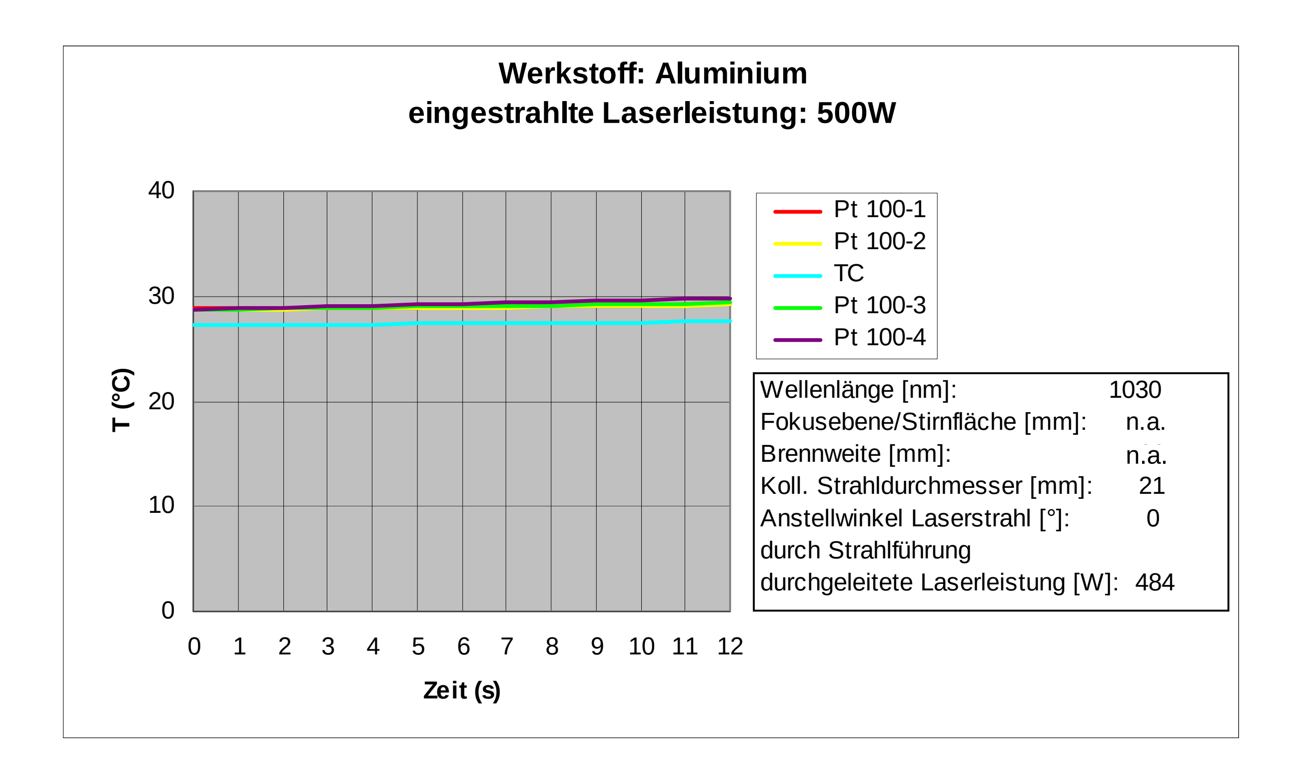


Abb. 6.18 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (koll. Str.; Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 500 W, Anstellwinkel: 0°)

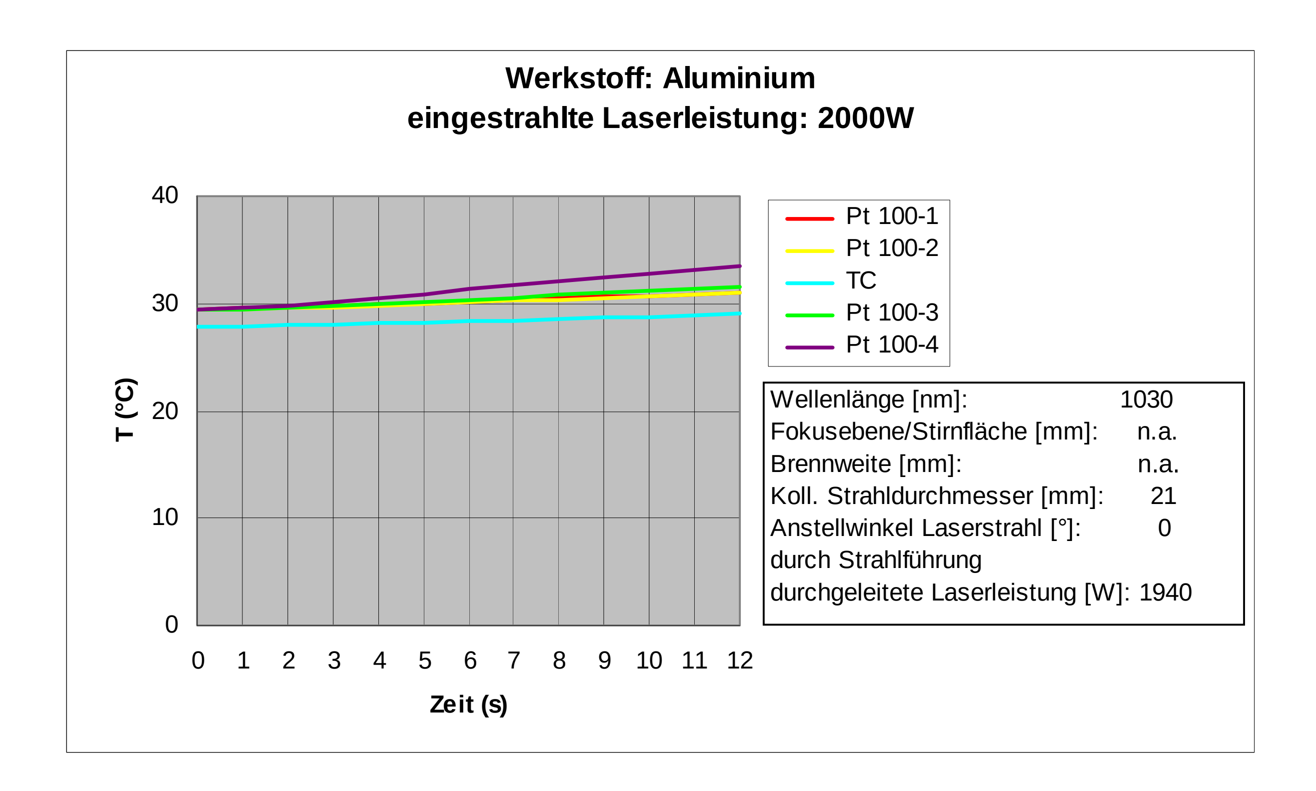


Abb. 6.19 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (koll. Str.; Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 2000 W, Anstellwinkel: 0°)

Durch Dejustage des Strahls, hier nachgestellt durch eine Verkippung der Abschirmung, werden signifikante Anteile der Laserstrahlung absorbiert, was sich in einem Anstieg der Temperatursignale der Sensoren äußert.

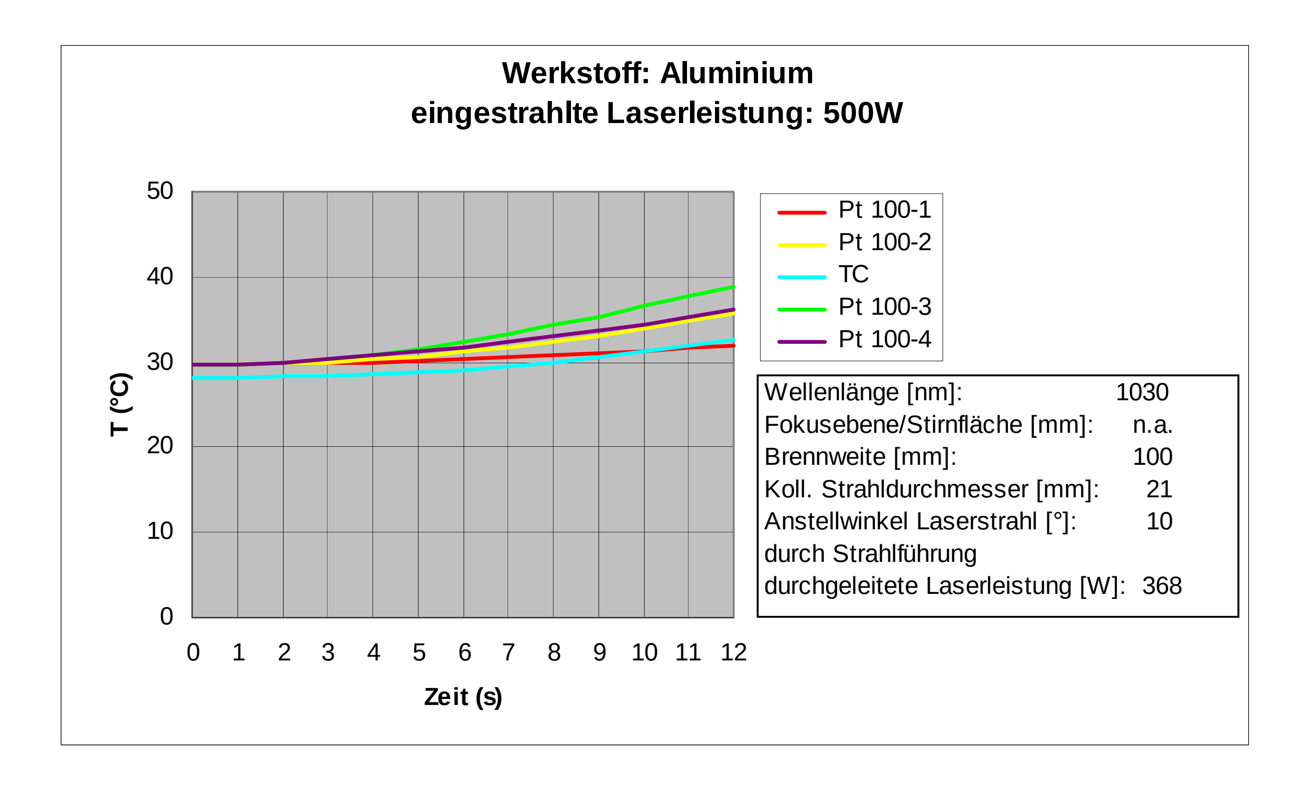


Abb. 6.20 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (koll. Str.; Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 500 W, Anstellwinkel: 10°)

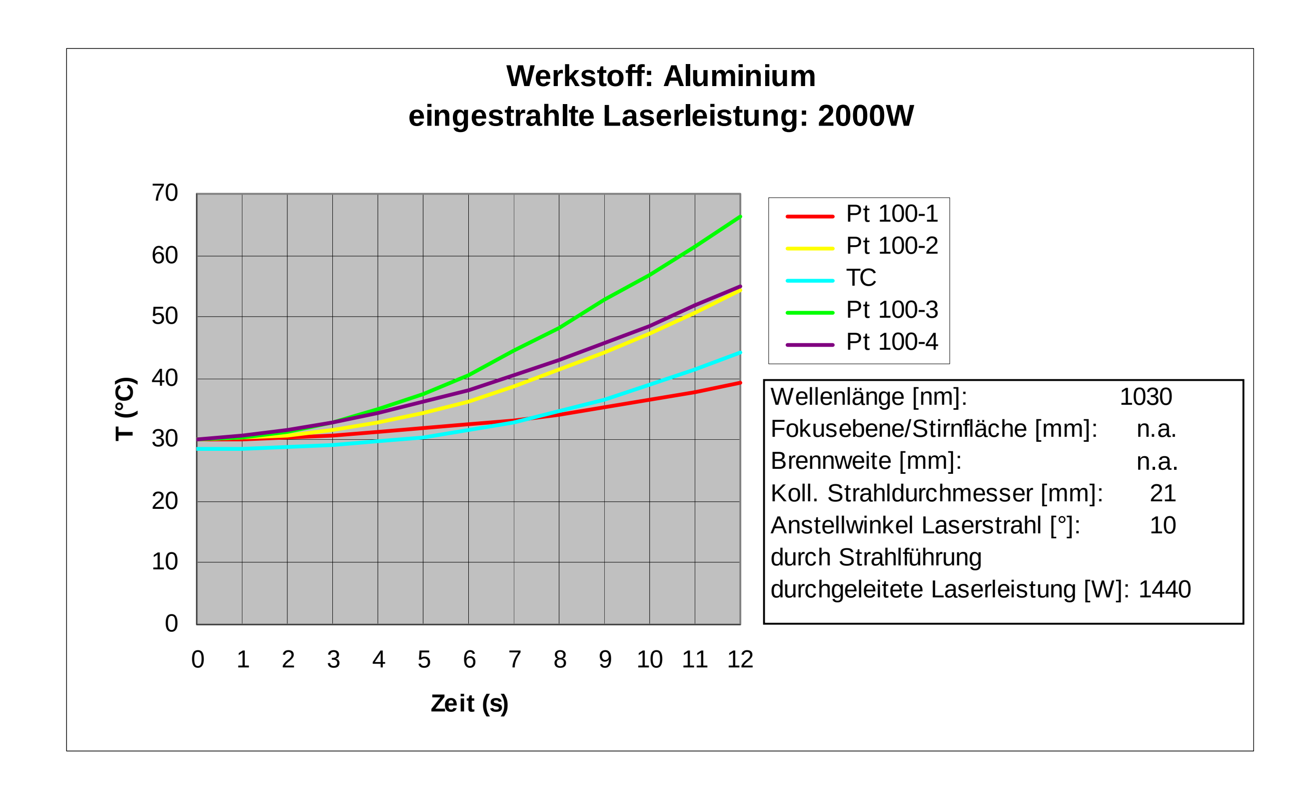


Abb. 6.21 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (koll. Str.; Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 2000 W, Anstellwinkel: 10°)

Absorptionserhöhung durch Lackieren

Eine Absorptionserhöhung der Abschirmung durch matte schwarze Lackierungen führen – wie erwartet – zu einer stärkeren Temperaturerhöhung und damit zu einem steileren Signalanstieg des entsprechend vergleichbar positionierten Sensors auf der Abschirmung.

Abschirmungen auf Polymerbasis

Abschirmungen auf Polymerbasis weisen grundlegend andere physikalische Eigenschaften als die Aluminiumwerkstoffe auf. In diesem Zusammenhang sind die Absorptionseigenschaften (höherer Absorptionskoeffizient als unlackiertes Al-Halbzeug), die geringere Wärmeleitfähigkeit und die geringere thermische Beständigkeit von Kunststoffen zu berücksichtigen.

Die Versuche mit einem kollimierten Laserstrahl verdeutlichen einen nur moderaten Anstieg der Temperaturen innerhalb 10 s.

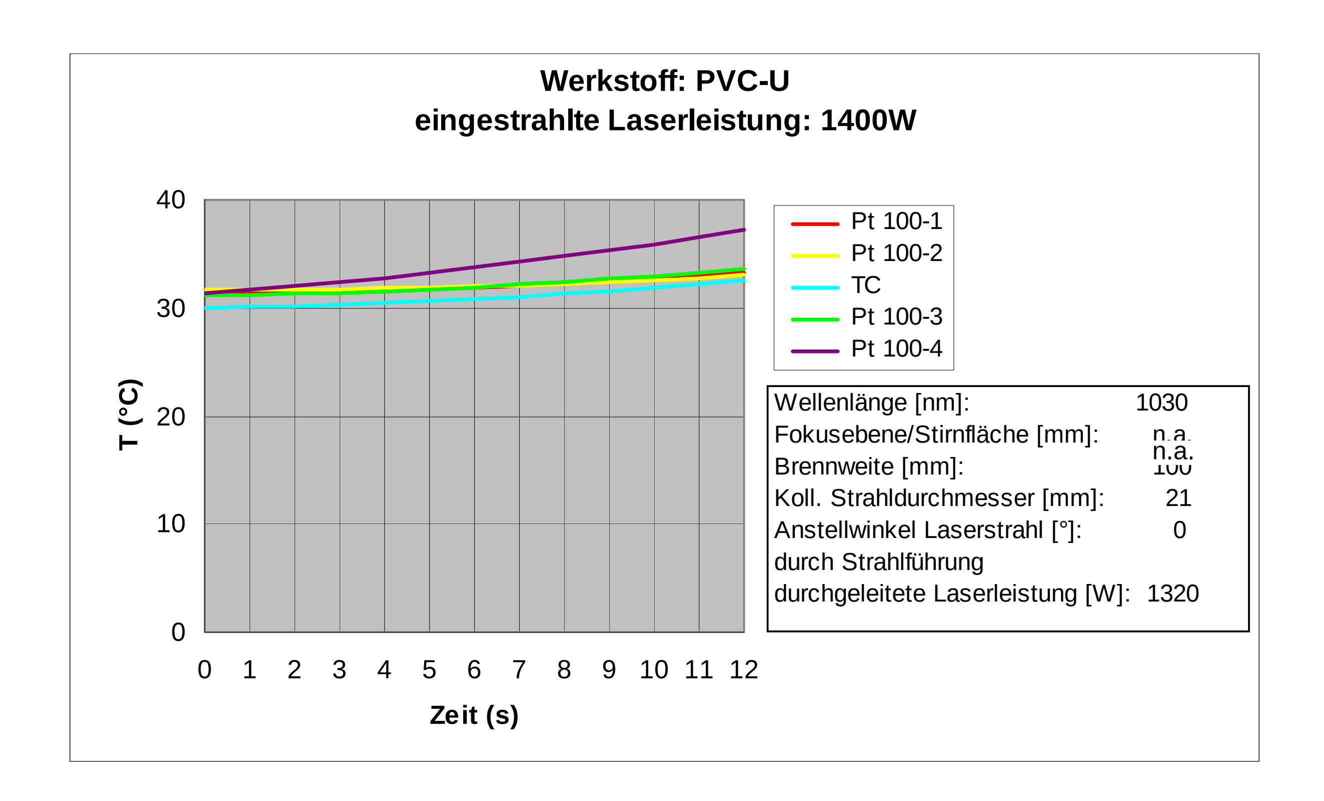
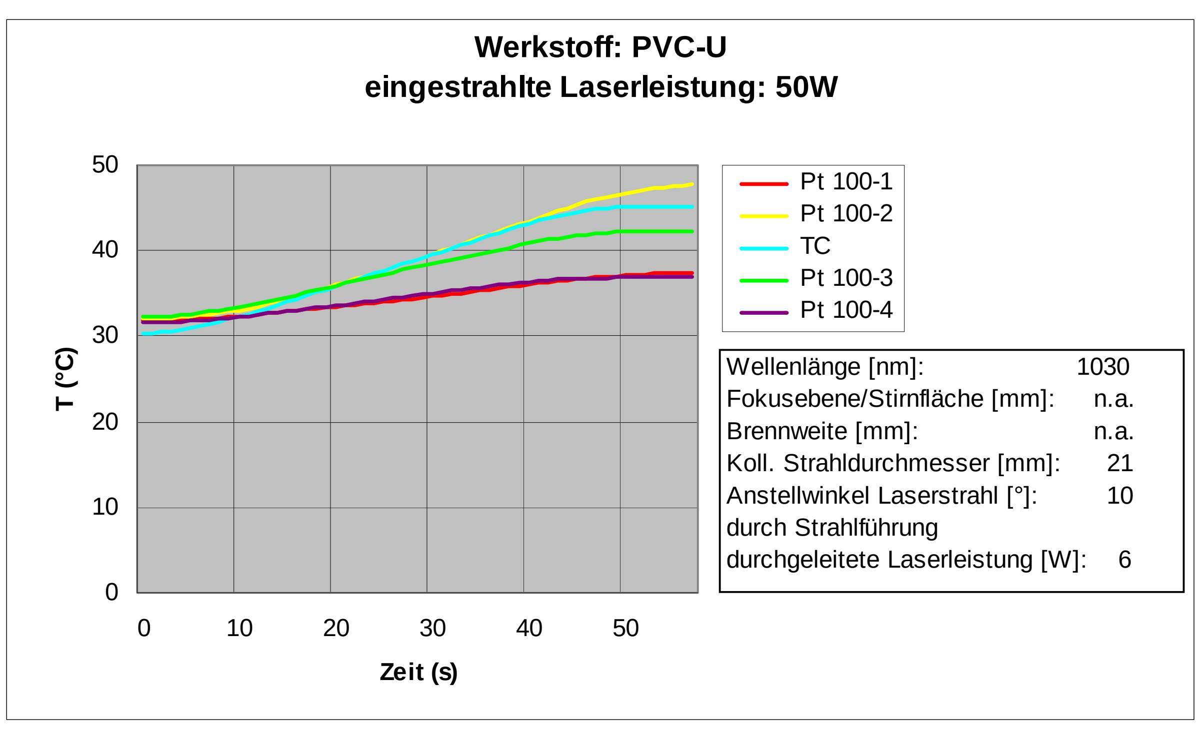


Abb. 6.22 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (koll. Str.; Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 1400 W, Anstellwinkel: 0°)

Eine Verkippung führt zur Absorption signifikanter Anteile der Laserstrahlung. Dieses äußert sich aufgrund der geringen Wärmeleitung innerhalb 10 s aber nur in einer moderaten Temperaturerhöhung, obwohl die Abschirmung in Teilbereichen bereits erweicht und degradiert. Die Versuche konnten über eine Zeitbasis von 100 s daher nur bis maximal 50 W durchgeführt werden.



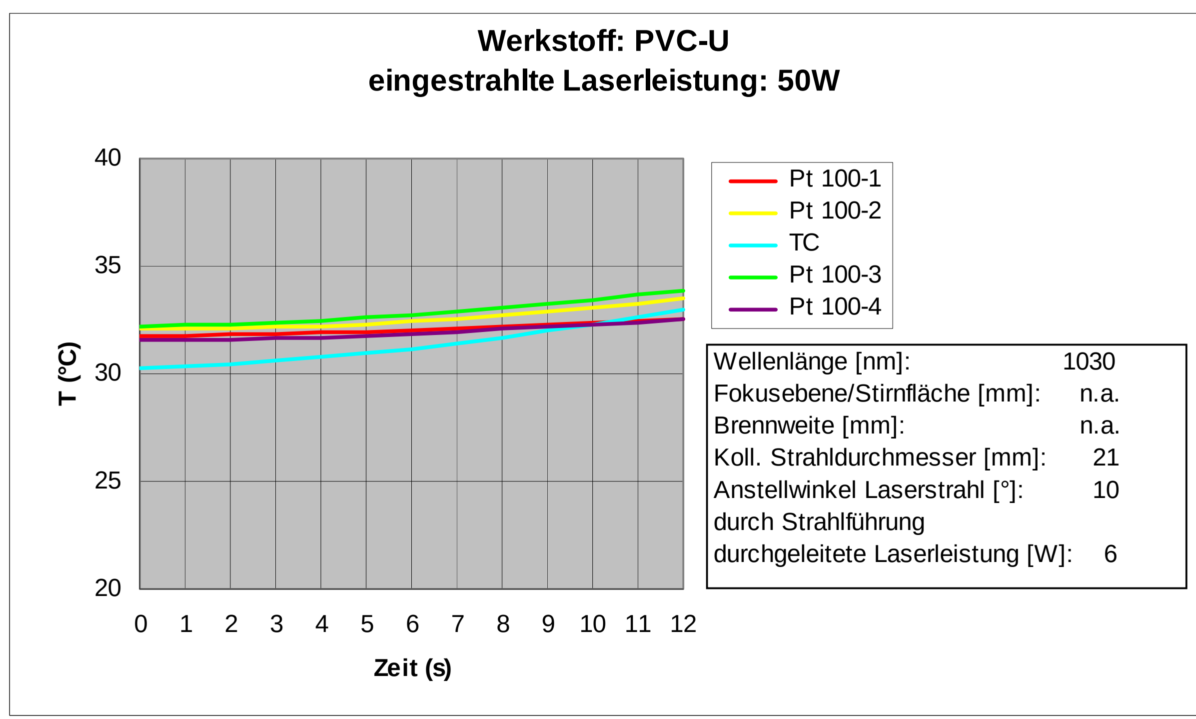


Abb. 6.23 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (koll. Strahl; eingestrahlte Leistung: 50 W, Anstellwinkel: 10° oben: Bereich bis 100 s; unten: Bereich bis 10 s.

Schlussfolgerungen

Für die Integration von Temperatursensoren zur Überwachung der Strahlführung von HLG ergeben sich folgende Anforderungen:

Aufgrund der nicht vorhersehbaren Winkellage eines dejustierten (z. B. kollimierten) Laserstrahls sind zwingend mehrere Sensoren vorzusehen – unabhängig von der

geforderten Architektur der Steuerung. Diese müssen in radialer und axialer Richtung (im betrachteten Fall einer rohrförmigen Abschirmung) bzw. auf dem Umfang der Abschirmung platziert werden. Für die Befestigung sind die vorgeschriebenen Klebstoffe (hohe Wärmeleitfähigkeit) zu verwenden.

Die untersuchte Polymerabschirmung weist gegenüber einer Abschirmung aus Metall – wie z. B. Aluminium – inhärente Nachteile auf: höhere Absorption, geringere Wärmeleitung und geringere thermische Zerstörschwelle.

Hierdurch muss bereits auf geringe Temperaturunterschiede zwischen bestimmungsgemäßem Betrieb und Fehlerbedingungen (Dejustage) aktiv steuerungstechnisch reagiert werden, um eine partielle Zerstörung der Abschirmung und einen möglichen Austritt gefährlicher Laserstrahlung zu vermeiden. Im worst-case-Fall kann es bei ungünstiger Position der Sensoren dazu kommen, dass diese nur einen geringen Temperaturanstieg detektieren und die Abschirmung an einer anderen Position thermisch überbelastet wird und versagt. Um ein akzeptables Alarmsignal-/Normalsignal-Verhältnis zu erreichen, erscheint eine Kompensation von Änderungen der Normaltemperatur zwingend erforderlich.

Die untersuchten Aluminiumabschirmungen leiten aufgrund ihrer höheren Wärmeleitung die absorbierte Energie besser zu den Sensoren, wodurch sich ein besseres Ansprechverhalten ergibt.

Zudem ermöglichen die passiven physikalischen Eigenschaften von Aluminium eine deutlich längere Expositionszeit in Fehlerfällen bis zum Versagen. Die Verhältnisse von Alarmsignal/Normalsignal liegen für die Betrachtung einer Dejustage des kollimierten Strahls mit einer Leistung von 500 W nach 10 s im Bereich von unter 10 °C, im Bereich nach 5 s von unter 5 °C, für eine Leistung von 2000 W zwischen 30 °C (10 s) und 15 °C (5 s).

Wird lediglich ein aktiver Schutz gegen Versagen gefordert, so können aufgrund der Verhältnisse von Alarmsignal zu Normalsignal Schwellwerte im Bereich eines Δv von über 20 °C angesetzt werden. Wird eine schnelle Erkennung von Fehlerbedingungen auch für kleine Laserstrahlleistungen verlangt, beträgt das Alarmsignal/Normalsignal-Verhältnis weniger als 10 °C; in diesen Fällen ist wieder eine Temperaturkompensation der Normaltemperatur angeraten.

6.5 Qualifizierung der Sicherheitssteuerungen

In diesem Abschnitt werden die SRP/CS in Verbindung mit einer Sicherheitssteuerung untersucht. Gegenstand der Untersuchung sind insbesondere die Systemreaktionszeiten (vgl. dazu auch Anhang 5).

6.5.1 Systemreaktionszeiten

<u>Signallaufzeiten</u>
Neben der direkten Antwort der Sensoren/Schalter wurden die Signallaufzeiten am Ausgang der Steuerung -K1- und am Ausgang von Sicherheitsrelais -Q1- (Simulation einer lasergeräteseitigen Verarbeitung) abgegriffen. Bei der Versuchsdurchführung wurde praxisorientiert vorgegangen; d. h.

- die Sensoren wurden entsprechend den Einbauregeln montiert, die Schaltabstände entsprechend der Sensorposition im HLG und dem Objekt (Werkstück) adaptiert.

- als Triggersignal wurde das Stromsignal einer Kontaktnadel (Auflagekontrolle) benutzt (Messungen für mechanischen Taster, induktiven, kapazitiven Sensor und Ultraschallsensor)
- Als Triggersignale für die MEMS-Sensoren (Neigung, Beschleunigung) wurde eine Lichtschranke benutzt

Im Folgenden sind die Signallaufzeiten tabellarisch dargestellt.

Tab. 6.3 Signallaufzeiten nach verschiedenen funktionalen Blöcken der Steuerung (Abheben)

Signallaufzeiten Triggersignal: Kontaktnadel					
Sensortyp: mechanischer Taster			Sensortyp: kapazitiver Sensor (berührungslos)		
Nr.	nach PLC (K1) [ms]	nach Relais (Q1) [ms]	Nr.	nach PLC (K1) [ms]	nach Relais (Q1) [ms]
1	17,0	19,3	1	28,7	n.b.
2	16,0	25,1	2	13,0	n.b.
3	19,4	26,1	3	31,9	n.b.
4	19,3	21,3	4	54,0	n.b.
5	15,5	18,3	5	40,5	n.b.
6	14,6	17,8	6	36,1	n.b.
7	16,3	16,4	7	35,5	n.b.
8	16,1	24,3	8	38,2	n.b.
9	14,3	27,4	9	38,4	n.b.
10	11,9	26,4	10	22,3	n.b.

Sensortyp: induktiver Sensor (berührungslos)			Sensortyp: Ultraschallsensor (berührungslos)		
Nr.	nach PLC (K1) [ms]	nach Relais (Q1) [ms]	Nr.	nach PLC (K1) [ms]	nach Relais (Q1) [ms]
1	11,3	n.b.	1	172,3	n.b.
2	72,7	n.b.	2	122,4	n.b.
3	30,6	n.b.	3	77,0	n.b.
4	10,4	n.b.	4	179,9	n.b.
5	26,3	n.b.	5	100,5	n.b.
6	43,8	n.b.	6	72,5	n.b.
7	42,5	n.b.	7	95,8	n.b.
8	32,1	n.b.	8	75,8	n.b.
9	29,7	n.b.	9	96,2	n.b.
10	42,8	n.b.	10	81,2	n.b.

* PLC= Sicherheits-Kleinsteuerung
n. b.: nicht bestimmt

Signallaufzeiten Triggersignal: Kontaktnadel					
Sensortyp: induktiver Sensor (Stößel)			Sensortyp: kapazitiver Sensor (Stößel)		
Nr.	nach PLC (K1) schnelles Abheben [ms]	nach PLC (K1) langsames Abheben [ms]	Nr.	nach PLC (K1) schnelles Abheben [ms]	nach PLC (K1) langsames Abheben [ms]
1	35,9	204,6	1	22,7	274,7
2	35,0	249,2	2	42,8	284,1
3	44,5	219,8	3	39,3	206,1
4	26,3	292,4	4	50,3	221,7
5	30,2	310,0	5	45,4	360,5
6	27,7	252,7	6	46,0	263,7
7	36,8	253,8	7	62,2	269,8
8	34,6	235,0	8	40,8	293,5
9	27,4	130,8	9	54,7	220,4
10	36,8	234,5	10	38,6	214,5

* PLC= Sicherheits-Kleinsteuerung

Im Folgenden sind die Signalverzögerungszeiten für den Neigungssensor HY-Line, SCA 121T-D05 für verschiedene Neigungen angegeben. Für das Triggersignal wurde das Signal einer Lichtschranke benutzt, die derart montiert wurde, dass der HLG-Prototyp (Kante) den Lichtstrahl bei einem zuvor eingestellten Neigungswinkel unterbricht.

Tab. 6.4 Signallaufzeiten am Ausgang der Sicherheits-Kleinsteuerung (Neigen)

Signallaufzeiten Triggersignal: Lichtschranke							
Sensortyp: Neigungssensor							
10°				**20°**			
X-Achse		**Y-Achse**		**X-Achse**		**Y-Achse**	
Nr.	nach PLC (K1) [ms]	**Nr.**	nach PLC (K1) [ms]	**Nr.**	nach PLC (K1) [ms]	**Nr.**	nach PLC (K1) [ms]
1	33,8	1	10,6	1	15,8	1	25,5
2	37,6	2	6,1	2	24,9	2	27,2
3	33,0	3	21,4	3	25,2	3	32,0
4	35,7	4	3,8	4	34,5	4	28,6
5	41,5	5	4,2	5	29,5	5	24,0
6	20,6	6	29,5	6	41,7	6	23,5
7	22,8	7	33,4	7	38,0	7	21,0
8	31,4	8	32,9	8	37,5	8	29,7
9	26,6	9	37,9	9	31,4	9	22,1
10	25,8	10	20,8	10	42,9	10	31,7

Signallaufzeiten Triggersignal: Lichtschranke							
Sensortyp: Neigungssensor							
30°				**40°**			
X-Achse		**Y-Achse**		**X-Achse**		**Y-Achse**	
Nr.	nach PLC (K1) [ms]	**Nr.**	nach PLC (K1) [ms]	**Nr.**	nach PLC (K1) [ms]	**Nr.**	nach PLC (K1) [ms]
1	28,8	1	13,8	1	47,0	1	33,3
2	24,4	2	26,4	2	24,6	2	18,0
3	24,4	3	33,0	3	15,5	3	27,2
4	37,0	4	37,6	4	30,0	4	17,7
5	15,8	5	23,0	5	26,0	5	25,9
6	16,8	6	19,1	6	33,0	6	14,1
7	25,3	7	26,1	7	14,1	7	26,3
8	26,6	8	24,8	8	30,0	8	27,6
9	26,8	9	22,0	9	30,1	9	33,6
10	33,9	10	24,0	10	38,7	10	29,7

Signallaufzeiten Triggersignal: Lichtschranke			
Sensortyp: Neigungssensor			
50°			
X-Achse		**Y-Achse**	
Nr.	nach PLC (K1) [ms]	**Nr.**	nach PLC (K1) [ms]
1	22,0	1	18,9
2	10,9	2	34,2
3	17,8	3	22,2
4	25,7	4	21,2
5	34,9	5	26,0
6	18,6	6	27,2
7	10,8	7	22,0
8	18,9	8	31,1
9	15,9	9	22,4
10	20,8	10	30,2

Die Signalverarbeitungszeiten bzw. Systemreaktionszeiten der Sicherheits-Kleinsteuerung, Elan Protect-PSC-CPU-MON, sind in der folgenden Tabelle angegeben.

Tab. 6.5 Systemreaktionszeiten der Sicherheits-Kleinsteuerung (Protect-PSC-CPU-MON)

Ausgang PROTECT-PSC	Systemreaktionszeit
Mode 1	
Halbleiter	52,6 ms
Relais	67,5 ms
Mode 3	
Halbleiter	22,6 ms
Relais	37,6 ms
Übertragen des EL Datenbereichs	47,8 ms

Für die HLG-Steuerung erfolgte eine Software-Programmierung (Mode 3). Dieses bedeutet, dass die Systemreaktionszeiten (für Halbleiter-Ausgänge von 22,6 ms und für Relais-Ausgängen von 37,6 ms) zu den Signalantwortzeiten (-laufzeiten) der jeweiligen Eingangseinheiten (Sensor + ggf. Verstärker u. Grenzwertschalter) addiert werden müssen.

Die Zykluszeit (Ausführungszeit) beträgt 15 ms. Die Selbstüberwachung der Halbleiterausgänge erfolgt durch Testimpulse einmal pro Zyklus, d. h. alle 15 ms wird ein Testimpuls von 450-500 µs Dauer erzeugt. Für diese kurze Zeitspanne wird der Ausgang abgeschaltet. Dieses bedeutet, dass die minimale Impulsdauer für eine sichere Erkennung durch die Protect-Sicherheitssteuerung bei 15 ms liegt.

Schlussfolgerungen

1) Ein Vergleich der Signallaufzeiten lässt erkennen, dass die Signalantworten der ausgewählten und eingesetzten Sensoren gegenüber den Systemreaktionszeiten der Sicherheits-Kleinsteuerung kurz sind. Veranschaulicht wird dieses durch den Vergleich der Sprungantworten der Sensoren (Abschnitte 6.1.1 bis 6.2.2) mit den gemessenen Signallaufzeiten am Ausgang der Sicherheits-Kleinsteuerung (Tab. 6.3 und Tab. 6.4). Die am Ausgang der Sicherheits-Kleinsteuerung gemessenen Signallaufzeiten liegen mindestens in der Größenordnung der Systemreaktionszeiten der Steuerung (Tab. 6.5) oder darüber.

Zu beachten ist, dass die Signallaufzeiten/Systemreaktionszeiten im Rahmen eines praktischen Umgangs mit dem HLG-Funktionsträger ermittelt wurden. Die Schaltabstände der berührungslosen Sensoren (induktiv, kapazitiv, Ultraschall) wurden optimal justiert (sichere Erkennung). Das HLG wird per Hand auf ein Werkstück aufgesetzt, so dass die Kontaktnadel in Kontakt zum Werkstück ist und die Sensoren das Objekt sicher erkennen. Danach wird der HLG-Funktionsträger von Hand abgehoben. Einflüsse für eine verlängerte Systemreaktionszeit sind zu sehen in:
- der Differenz zwischen Nennschaltabstand und gesichertem Schaltabstand der Sensoren sowie der Wiederholgenauigkeit der Sensoren (mehrere 100 µm),
- Hystereseeffekten der Sensoren,
- dem manuellen Führen/Verkippen des HLG.

2) Messungen hinter einem möglichen lasergeräteseitigen Sicherheitsrelais (Q1) verdeutlichen, dass durch das Bauteil eine typbedingte Signalverzögerung zwischen 3 ms und 14 ms addiert werden muss. Dieses korreliert mit der angegebenen typischen Ansprechzeit (bei U_{nenn} [Siemens, SR2M]) von 10 ms (ohne Prellzeit).

3) Bei Schaltelementen, die über eine vorgeschaltete Mechanik betätigt werden, müssen Einflüsse durch die mechanischen Bauteile berücksichtigt werden. Insbesondere beim langsamen Abheben des federbelasteten Stößels ergaben sich Systemreaktionszeiten von bis zu 300 ms. Einflussgrößen sind:

- Schaltweg des Tasters
- Position des Stößels zum induktiven oder kapazitiven Sensors (s. o. Nennschaltabstand/gesicherter Schaltabstand)
- Federkennlinie der Stößelfeder

Ziel ist es, den Stößelkopf (in den Positionen: hoch/tief) nahe um den Schaltpunkt der entsprechenden Bauteile zu platzieren, aber noch eine ausreichende Sicherheit der Erkennung im Betrieb zu gewährleisten (Weg-/Positionstoleranz). Zudem sollte die Stößelfeder derart ausgewählt werden, dass a) die max. zulässige Andruckkraft für HLG (verfügbare Ergonomietabellen) nicht überschritten wird und b) die Feder den Stößel sicher in die Normalstellung (nicht aufgesetzt) bewegt.

Ein Vergleich mit den in Abschnitt 3.2.2 ermittelten theoretischen maximal zulässigen Nachlaufzeiten verdeutlicht, dass bei der Konfiguration der Steuerung bzw. der SRP/CS eine Betrachtung der maximal zulässigen Nachlaufzeiten zwingend erforderlich ist. Insbesondere im Bereich der Hochleistungslaser mit mittleren Ausgangsleistungen über 1 kW folgt daraus, dass SRP/CS mit Systemreaktionszeiten von deutlich unter 100 ms eingesetzt werden müssen.
Bei Ansetzen einer maximalen Greifgeschwindigkeit von K_3 = 1000 mm/s müssen bei Abständen von d = 100 mm zwischen der Ausgangsposition der Extremität (z. B. Hand) und der Zone einer möglichen Laserstrahlungsemission Systemreaktionszeiten im Bereich von 80 ms realisiert werden.

7 Bewertung der Ergebnisse

7.1 Eignung verschiedener Sensoren

Die Ergebnisse und die daraus resultierenden Anforderungen sind im Folgenden nach Sensoren und Kriterien aufgelistet. (QE-Laser = Querempfindlichkeiten bei Laserbetrieb)

A) Auflage-/Kontaktüberwachung (berührend)

<u>1) Kontaktnadel:</u>

Mechanik	Die Nadel muss über eine ausreichende mechanische Stabilität verfügen. Entscheidend für die Einsetzbarkeit ist die Ausführung der Spitze. Sie muss abgerundet sein, um ein Verhaken auf dem Werkstück zu verhindern (vorteilhaft ist eine leicht schleppende/nicht stechende Position). Die Nadel muss aus einem Werkstoff sein, der angepasst auf das mit dem HLG zu bearbeitende Werkstück eine ausreichende Härte und einen geringen Abrieb aufweist.
Elektrik	Die Nadel muss aus einem leitfähigen Werkstoff bestehen. Das Werkstück muss ebenfalls leitfähig sein. Die Nadel ist in gewissen Abständen von etwaigen Verschmutzungen (Anhaftungen: metallisch, nicht metallisch) zu reinigen, um einen einwandfreien Einsatz zu gewährleisten.
Einbauposition/QE-Laser	Eine Bestrahlung mit dem Laser ist zu vermeiden, d. h. ein gewisser Abstand (ca. > 10 mm) zum Laserprozess und zu schmelzflüssigem Material ist erforderlich. Weitere Querempfindlichkeiten konnten nicht beobachtet werden.
Einbindung in Steuerung	Eine singuläre Nadel lässt eine starke Verkippung des HLG zu. Steuerungstechnisch muss sie als singuläre Eingabeeinheit Kat. 3 oder Kat. 4 erreichen, was nur über modulierte Signale und Testeinrichtungen ermöglicht werden kann. Wird sie mit anderen Eingabeeinheiten (Sensoren mit unterschiedlichen Wirkprinzipien, z. B. Ultraschall) in diversitärer Redundanz betrieben, so sind die Signale aller Eingabeeinheiten von der Sicherheitssteuerung (PLC) auf Plausibilität und Gleichzeitigkeit zu prüfen.

<u>2) Sensoren in Verbindung mit berührendem Stößel</u>

2a) Mechanische Taster:

Mechanik	Die Schaltwege des Tasters müssen dem Andruckweg des HLG bzw. den Stößelbewegungen, angepasst sein. Typischerweise liegt diese Strecke im Bereich weniger Millimeter (mm). Mechanische Taster werden in der Regel in Verbindung mit mechanischen Aufsatzkontrollen (Stößeln) verwendet. Die gesamte Mechanik der Stößel ist an den jeweiligen Anwendungsprozess anzupassen. Dieses

betrifft u. a. die Andruckkräfte, den Stößelverfahrweg sowie die Abschirmung der Mechanik. Insbesondere beim Laser-Pulver-Auftragschweißen müssen die Bauteile vor eindringendem Pulver geschützt werden, um ein Verhaken der Mechanik (Stößel bzw. Feder) zu vermeiden. Mechanische Eingabeeinheiten sollten daher immer in diversitärer Redundanz mit anderen Systemen betrieben werden.

Einbauposition/QE-Laser

Die mechanische Auflagekontrolleinheit ist staubgeschützt im HLG zu platzieren, um ein Verhaken und damit Fehler bei der Laserstrahlfreigabe zu vermeiden. Bei sachgerechter Auslegung wurden keine Querempfindlichkeiten in Bezug auf den Laserprozess beobachtet.
Die Stößelköpfe sind derart zur Prozesszone zu positionieren, dass eine Bestrahlung mit dem Laser vermieden wird, d. h. es ist ein gewisser Abstand zum Laserprozess und schmelzflüssigem Material erforderlich (ca. > 10 mm).

Einbindung in Steuerung

Bei den verwendeten Miniatur-Tastern handelt es sich um bewährte Bauteile. Sie gibt es in einkanaliger und zweikanaliger Ausführung. Die Taster sind in eine Steuerung mit diversitärer redundanter Struktur als eine Eingabeeinheit einzusetzen. Die Signale sind von der Steuerung entsprechend zu verarbeiten (s. o.). Zu beachten ist, dass bei federbelasteten Stößeln die Federkennlinie der verwendeten Rückstellfeder und damit die Zeit, die der federbelastete Stößel beim Abheben des HLG benötigt, um in die Endlage (Schaltpunkt) zu gelangen, die Nachlaufzeit (Laserstrahlung) maßgeblich beeinflussen kann.

2b) Induktive Sensoren

Mechanik

Die induktiven Sensoren sind derart zu montieren, dass sich die Schaltabstände zum federbelasteten Stößel über die Betriebsdauer nicht verändern. Mechanisch sehr robuster Sensor. Die ausgewählten Sensoren bauen sehr klein (M5 Gewinde).

Elektrik/Elektronik

Für induktive Sensoren, die in Verbindung mit einem federbelasteten Stößel eingesetzt werden, ist der Reduktionsfaktor unerheblich, da der Schaltabstand unveränderlich bleibt, sofern der metallische Stößelwerkstoff nicht verändert wird. Der ausgewählte – weil klein bauende – Sensor ist daher kein Faktor-1-Sensor (Reduktionsfaktor).

Einbauposition/QE-Laser

Die Schaltabstände (Objekterkennung) sind aufgrund der Position des Stößels zum Einbauort der Sensoren unbedingt in der Planungsphase zu definieren und exakt einzuhalten. Wie bei den mechanischen Tastern ist zu beachten, dass bei federbelasteten Stößeln die Federkennlinie der verwendeten Rückstellfeder die Nachlaufzeit (Laserstrahlung) maßgeblich beeinflussen kann.

Einbindung in Steuerung	Bei den verwendeten Miniatur-Sensoren (induktiv) handelt es sich um bewährte Bauteile. Die Sensoren sind in eine Steuerung mit diversitärer redundanter Struktur als eine Eingabeeinheit einzusetzen. Die Signale sind von der Steuerung entsprechend zu verarbeiten (s. o.).

2c) Kapazitive Sensoren

Mechanik	Die verwendeten kapazitiven Sensoren sind mechanisch sehr robust und bauen sehr klein (M5 Gewinde).
Elektrik/Elektronik	Aufgrund des Wirkprinzips können kapazitive Sensoren auch für nicht-metallische Stößel eingesetzt werden. Die Sensoren werden in Verbindung mit einem Messwertverstärker verwendet. Aufgrund der baulichen Abmessungen ist der Verstärker nicht im HLG zu platzieren (die angegebenen Kabellängen dürfen nicht überschritten werden).
Einbauposition/QE-Laser	Vergleichbar zu induktiven Sensoren. Der Einfluss des federbelasteten Stößels auf die Nachlaufzeit ist zu berücksichtigen.
Einbindung in Steuerung	Bei den verwendeten Miniatur-Sensoren (kapazitiv) handelt es sich um bewährte Bauteile. Die Sensoren sind (auch aufgrund der genannten Querempfindlichkeiten) in eine Steuerung mit diversitärer redundanter Struktur als eine Eingabeeinheit einzusetzen. Die Signale sind von der Steuerung entsprechend zu verarbeiten (s. o.).

B) Abstandsüberwachung (berührungslos)

1) Induktive Sensoren

Mechanik	Die induktiven Sensoren sind positionsfest am HLG-Rahmen zu montieren, so dass sich die Schaltabstände über die Betriebsdauer nicht verändern. Die verwendeten induktiven Sensoren sind mechanisch sehr robust und bauen – je nach Typ – sehr klein (M5 Gewinde).
Elektrik/Elektronik	Es wurden verschiedene Bautypen induktiver Sensoren zur berührungslosen Werkstückdetektion (Abstands-/Auflagekontrolle) eingesetzt: - Sensoren mit unterschiedlichen Reduktionsfaktoren - Sensoren mit unterschiedlichen Schaltabständen Der Reduktionsfaktor sowie die Schaltabstände bestimmen maßgeblich die Prozesstoleranz des Sensors. Die typischen Schaltabstände klein bauender induktiver Sensoren liegen im Bereich weniger Millimeter (hier 1,2 mm). Beim Wechsel von Werkstücken aus Stahlblechen auf solche mit Aluminium (bzw. anderer Suszeptibilität), verkürzt sich bei Sensoren mit einem Reduktionsfaktor = 1 der Schaltabstand. Dieses hat zur Folge, dass die Sensoren bei rauen Werkstückoberflächen oder leichter Verkippung des HLG ständig wechselnde Schaltzustände

einnehmen (an/aus); dieses behindert einen bestimmungsgemäßen Laserbearbeitungsprozess. Theoretisch ließe sich diese Problematik mit Hilfe des Einsatzes eines Tiefpassfilters reduzieren (wobei das Problem der Festlegung der Grenzfrequenz bestünde), das Verhalten kann aber durch Verwendung von induktiven Sensoren mit einem Reduktionsfaktor = 1 oder mit längeren Schaltabständen abgemildert werden.

Die größte Prozesstoleranz hinsichtlich der Bearbeitung von rauen Oberflächen und der Verkippungen des HLG wurden mit einem induktiven Sensor, der über einen Schaltabstand von 4,8 mm verfügt, erreicht. Je nach Montageort der Sensoren muss beachtet werden, dass ein größerer Schaltabstand die kritische Verkippung und den Nachlauf negativ beeinflussen können.

Die untersuchten Sensoren mit Reduktionsfaktor = 1 bzw. längeren Schaltabständen weisen größere Bauteilabmessungen (M8) auf (z. B. BES M08EG1-PSC15A-S04G-W).

Einbauposition/QE-Laser

Die Schaltabstände (Objekterkennung) sind aufgrund der Position des Werkstücks zum Einbauort der Sensoren unbedingt in der Planungsphase zu definieren und exakt einzuhalten. Typischerweise liegen die Abstände im Bereich unter einem Millimeter. Wie oben beschrieben bieten spezielle induktive Sensoren größere gesicherte Schaltabstände von ca. 5 mm, bei allerdings größeren Bauteilabmaßen (M8).

Abgesehen von den oben genannten Schalteigenschaften konnten Beeinflussungen der Sensoren durch den Laserprozess nicht beobachtet werden.

Einbindung in Steuerung

Bei den verwendeten Miniatur-Sensoren (induktiv) handelt es sich um bewährte Bauteile. Die Sensoren sind in eine Steuerung mit diversitärer redundanter Struktur als eine Eingabeeinheit einzusetzen. Die Signale sind von der Steuerung entsprechend zu verarbeiten (s. o.).

<u>2) kapazitive Sensoren</u>

Mechanik

Vergleichbar zu induktiven Sensoren sind auch die kapazitiven Sensoren mechanisch sehr robust und bauen sehr klein (M5 Gewinde).

Elektrik/Elektronik

Aufgrund des Wirkprinzips können kapazitive Sensoren auch für Nicht-Metalle eingesetzt werden. Die Sensoren werden in Verbindung mit einem Messwertverstärker verwendet. Aufgrund der baulichen Abmessungen ist der Verstärker nicht im HLG zu platzieren (die angegebenen Kabellängen dürfen nicht überschritten werden). Ähnlich wie bei mechanischen Sensoren werden Abstände unterhalb des Nennschaltabstandes realisiert, um Werkstücke verschiedener Dielektrizität (nicht leitfähig) sicher zu erkennen.

Einbauposition/QE-Laser	Für die Einbauposition bestehen vergleichbare Anforderungen wie bei induktiven Sensoren. Es konnten nur sehr vereinzelt Querempfindlichkeiten im Bereich der Laserapplikation auf Medien im Messbereich (möglicherweise Gase/Schmelzspritzer) beobachtet werden. Die Langzeitstabilität des Sensors konnte nicht bewertet werden. Problematisch ist die Querempfindlichkeit der verwendeten kapazitiven Sensoren hinsichtlich einer mit Fluiden benetzten Werkstückoberfläche. In ungünstigen Fällen verbleibt beim Abheben des Sensors von der Werkstückoberfläche (bzw. Abheben des HLG) an der Detektionsfläche eine Benetzung, so dass der Sensor im Schaltzustand „an“ verbleibt und fälschlicherweise eine Auflage suggeriert (fehlerhafte Objekterkennung) und die Laserstrahlung freigibt. Diese systematischen Fehler müssen beim Einsatz kapazitiver Sensoren unbedingt durch Beachtung der Anwendungsgrenzen ausgeschlossen werden, um das HLG sicher betreiben zu können.
Einbindung in Steuerung	Bei den verwendeten Miniatur-Sensoren (kapazitiv) handelt es sich um bewährte Bauteile. Die Sensoren sind (auch aufgrund der genannten Querempfindlichkeiten im Zusammenhang mit Fluiden) in eine Steuerung mit diversitärer redundanter Struktur als eine Eingabeeinheit einzusetzen. Die Signale sind von der Steuerung entsprechend zu verarbeiten (s. o.).

3) Ultraschallsensor

Mechanik	Für die Einbauposition bestehen vergleichbare Anforderungen wie bei induktiven Sensoren. Die ausgewählten Ultraschallsensoren verfügen über relativ kleine Abmaße (12 mm x 14 mm x 27 mm).
Elektrik/Elektronik	Ultraschallsensoren können für alle Werkstoffe verwendet werden.
Einbauposition/QE-Laser	Die minimalen und maximalen Schaltabstände (Objekterkennung) sind aufgrund der Position des Werkstücks zum Einbauort der Ultraschallsensoren unbedingt in der Planungsphase zu definieren. Zwar ermöglicht der Ultraschallsensor ein einfach durchzuführendes Teachen des Schaltabstandes; dieses erfolgt jedoch nur innerhalb des Schaltabstandsbereiches, der bei dem untersuchten Sensor zwischen 10 mm und 200 mm liegt. Dieses bedeutet, dass die ausgewählten Ultraschallsensoren aber auch für frei geführte HLG mit Abständen bis 200 mm/20 cm zum Werkstück verwendet werden können. Ultraschallsensoren sind auf das Medium im Messbereich angepasst. Veränderungen des Mediums (andere Gase, Gasströmungen und insbesondere Turbulenzen) führen zu fehlerhafter Objekterkennung. Bei Laserverfahren mit erhöhten Gasgeschwindigkeiten im HLG-Arbeitskopfbereich (Schneiden) ist der Sensor nicht geeignet. Für

	Applikationen wie Markieren, Abtragen, Feinschweißen, (cw/pm) zeigte der Sensor keine nachteiligen Effekte. Generell sollte darauf geachtet werden, Ultraschallsensoren (bzw. deren Messkonus) nicht in den Konvektionsströmungsbereich des Laserprozesses zu platzieren sondern einige cm davon entfernt.
Einbindung in Steuerung	Bei dem verwendeten Miniatur-Ultraschallsensor handelt es sich um ein bewährtes Bauteil. Insbesondere auch aufgrund der benannten Querempfindlichkeiten sollten Ultraschallsensoren in eine Steuerung mit diversitärer redundanter Struktur als eine Eingabeeinheit eingesetzt werden. Die Signale sind von der Steuerung entsprechend zu verarbeiten (s. o.).

C) Lage-/Positions- und Beschleunigungsüberwachung (berührungslos)

1) MEMS-Neigungssensoren

Mechanik	Die MEMS-Neigungssensoren sind fest zu montieren, so dass sich ihre Lage über die Betriebsdauer nicht verändert. Die verwendeten Sensoren sind gekapselt, mechanisch sehr robust und klein bauend (30 x 30 x 13 mm bzw. 15 x 15 x 15 mm).
Elektrik/Elektronik	Ein Bezug zum Werkstoff ist nicht gegeben. Die Sensoren liefern ein analoges Signal, das mit Hilfe weiterer Schaltungselemente ausgewertet und umgewandelt werden muss. Die Signalverarbeitungseinheiten (Grenzwertschalter/Diskriminatoren) können aufgrund der baulichen Abmaße in der Regel nicht im HLG platziert werden. Neigungssensoren können in Verbindung mit einem Grenzwertschalter vorteilhaft eingesetzt werden, um die Freiheitsgrade der HLG und damit der Laserstrahlung sinnvoll einzuschränken. Typische Einsatzfelder sind die Detektion von Verkippen, Drehen und Abrutschen des HLGs vom Werkstück, insbesondere bei High-Power HLG-Anwendungen. Die Signalantwortzeiten der Neigungssensoren mit nachgeschalteten Auswerteeinheiten liegen im Bereich weniger Millisekunden oder kürzer und entsprechen damit denen anderer Sensoren. Im Einzelfall ist konstruktiv zu lösen, wie die Diskriminatoren einzustellen sind. Bei HLG, die in einer festen Ebene bewegt werden, können schaltungstechnisch sehr einfach feste Werte vorgesehen werden (Grenzwertschalter mit festen Werten). In anderen Fällen ist eine technisch einfache Verstellung anzustreben, um vor Arbeitsaufnahme die Grenzwerte festzulegen und einzustellen.
Einbauposition/QE-Laser	Im HLG oder am HLG. Es konnten keine Querempfindlichkeiten im Bereich der Laserapplikation beobachtet werden.

Einbindung in Steuerung

Bei den verwendeten Miniatur-MEMS Sensoren handelt es sich um bewährte Bauteile. Die Sensoren sind in eine Steuerung mit diversitärer redundanter Struktur als eine Eingabeeinheit einzusetzen. Die Signale sind von der Steuerung entsprechend zu verarbeiten (s. o.).

2) MEMS-Beschleunigungssensoren/Gyroskope

Mechanik

Die Sensoren sind fest zu montieren, so dass sich ihre Lage über die Betriebsdauer nicht verändert. Die verwendeten Beschleunigungssensoren sind gekapselt, mechanisch sehr robust und klein bauend (15 x 15 x 15 mm). Das Gyroskop ist in Verbindung mit der Auswerteelektronik auf einer Platine (26 x 32 mm) angeordnet und kann nachträglich gekapselt werden.
Ein Bezug zum Werkstoff ist nicht gegeben.

Elektrik/Elektronik

Die Sensoren liefern ein analoges Signal. In Verbindung mit einem Grenzwertschalter/Fensterdiskriminator können Beschleunigungssensoren vorteilhaft eingesetzt werden, um ein unbeabsichtigtes Abgleiten des HLG vom Werkstück zu detektieren und die Laserstrahlung zu isolieren. Besondere Beachtung verdient die Definition und Einstellung der Grenzwerte. Entscheidend für die Praxistauglichkeit dieser Sensoren ist das Signalverhältnis zwischen bestimmungsgemäßem Betrieb und einem vorhersehbaren Fehlerfall, d. h. einer unbeabsichtigten Beschleunigung (Abgleiten des HLG). Können beim bestimmungsgemäßen Betrieb von HLG z. B. durch Verhaken und Lösen eines in Kontakt mit dem Werkstück geführten HLG Beschleunigungsspitzen auftreten, die von der Amplitude im Bereich der Beschleunigungen bei einem fehlerhaften Abgleiten liegen, kann ein Beschleunigungssensor nicht sinnvoll verwendet werden. Diesbezüglich sollte auf Lage-/Neigungssensoren ausgewichen werden.
Vorteilhaft ist die Verwendung einer Sicherheits-Kleinsteuerung, die auch analoge Signale verarbeitet. Hier besteht die Möglichkeit, Grenzwerten über Software-Programme einzustellen.

Einbauposition/QE-Laser

Im HLG oder am HLG.
Es konnten keine Querempfindlichkeiten im Bereich der Laserapplikation beobachtet werden.

Einbindung in Steuerung

Bei den verwendeten Miniatur-Sensoren handelt es sich um bewährte Bauteile. Die Sensoren sind in eine Steuerung mit diversitärer redundanter Struktur als eine Eingabeeinheit einzusetzen. Die Signale sind von der Steuerung entsprechend zu verarbeiten (s. o.).

7.2 Eignung weiterer sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen

A) Zustimmtaster

Mechanik	Zustimmtaster gehören gem. DIN EN 60204-1 zu den Geräten zur Freigabesteuerung. Die Taster sind mechanisch fest am HLG zu montieren, so dass eine sichere Bedienung des HLG ermöglicht wird.
Elektrik/Elektronik	Am Markt sind 2- und 3-stufige Zustimmtaster verfügbar. Aus ergonomischen und sicherheitstechnischen Aspekten sollte bei HLG ein 3-stufiger Taster zum Einsatz kommen, der eine Abschaltung sowohl beim Loslassen als auch beim festen Durchdrücken in Paniksituationen einleitet. Die verwendeten 3-stufigen Taster erfüllen die Anforderungen der DIN EN 60947-5-8 hinsichtlich der Vermeidung eines unbeabsichtigten Anlaufs, da die Kontakte bei der Rückstellung von Stufe 3 nach 1 in der Stufe 2 nicht geschlossen werden.
Einbauposition/QE-Laser	Aus Lasersicherheitsaspekten (kein Eingreifen mit der zweiten Hand in die Prozesszone) sollte – wenn anwendungstechnisch möglich – einer Zweihandschaltung, d. h. einer Betätigung mittels zwei Zustimmtastern der Vorzug gegeben werden. Je nach konstruktiver Auslegung (Bauform) des HLG können die Zustimmtaster als Einbautaster oder als komplette Griffelemente in das HLG integriert oder adaptiert werden. Bei der Festlegung der Griffpunkte (Abstände relativ zum Laserprozessbereich) sind Aspekte der Greifgeschwindigkeit und der maximalen Nachlaufzeit (Laserstrahlung) zu berücksichtigen. Es konnten keine Querempfindlichkeiten im Bereich der Laserapplikation beobachtet werden.
Einbindung in Steuerung	Die Zustimmtaster (Betätiger) werden – ähnlich zur Zweihandsteuerung – mit einer Signalauswerteeinheit bzw., wie im HLG-Versuchsträger realisiert, mit einer Sicherheits-Kleinsteuerung kombiniert. In Verbindung mit der Sicherheits-Kleinsteuerung erreichen die Zustimmtaster Steuerungskategorien von Kat. 3 oder höher. Der Zustimmtaster sollte aus Sicherheitsaspekten bezüglich der Signalabfolge vorzugsweise derart in die Steuerung eingebunden werden, dass erst nach Freigabe aller den bestimmungsgemäßen Betrieb induzierenden Sensoren die Freigabe manuell erteilt wird. Bei Unterbrechung des bestimmungsgemäßen Betriebes (z. B. Abheben) muss der Zustimmtaster losgelassen und erneut nach Freigabe aller den bestimmungsgemäßen Betrieb induzierenden Sensoren gedrückt werden. Hierdurch lässt sich ein automatisches Anlaufen (Freigabe der Laserstrahlung) vermeiden. Die von den Zustimmschaltern an die Steuerung über-

mittelten Signale werden auf Plausibilität und Gleichzeitigkeit überprüft. Bezüglich der Gleichzeitigkeit (Festlegung des erlaubten zeitlichen Versatzes der Signale der Zustimmtaster) sind sicherheitstechnische Aspekte (bzw. normativen Vorgaben) und Aspekte der HLG-Praktikabilität abzuwägen. Für den HLG-Versuchsträger wurde ein zeitlicher Versatz von 1 bis maximal 2 Sekunden programmiert.

B) Sicherheits-Kleinsteuerung (Logik, PLC)

Mechanik	Die verwendeten Sicherheits-Kleinsteuerungen sowie die zugehörigen Erweiterungsmodule und Netzteile sind für eine Hutschienenmontage in einem Schaltschrank vorgesehen.
Elektrik/Elektronik	Die untersuchten Sicherheits-Kleinsteuerungen verfügen über ein sicheres Kontrollermodul, das mit Ein- und Ausgabemodulen sowie einem Netzteil kombiniert wird. Je nach Ausführung steht eine unterschiedliche Anzahl digitaler sicherer und nicht-sicherer Eingänge sowie Ausgänge zur Verfügung. Komplexere Sicherheitssteuerungen verfügen auch über analoge Eingänge. Mit der zur Verfügung stehenden Anzahl von Eingängen typischer Sicherheits-Kleinsteuerungen (ohne Erweiterungsmodule) kann z. B. eine Aufsatzkontrolle in Verbindung mit einer Zweihandzustimmschaltung realisiert werden. Sollen weitere Sensoren eingebunden werden, so kann eine Erweiterung erforderlich werden. Beide eingesetzten Sicherheits-Kleinsteuerungen (ELAN, PSC-CPU-MON sowie PILZ, Typ PSS 3047-3) erlauben eine Programmierung von logischen Verknüpfungen (und/oder) und von anderen logischen Funktionen/Operationen in einer Programmiersprache gemäß IEC 61131. Beide Steuerungen sind der Steuerungskategorie 4 nach DIN EN 954-1 bzw. PL=e nach DIN EN 13849-1 zugeordnet. Die angegebenen Systemreaktionszeiten können je nach Steuerung und verwendeter Betriebsart (Mode) sowie abhängig von den Ausgängen (Halbleiter/Relais) zwischen 20 ms und 70 ms betragen. Insbesondere bei High-Power-HLG sollte daher der zulässige Nachlauf (Zeit) in der Risikobeurteilung ermittelt werden, um nachfolgend eine Sicherheitssteuerung bzw. die Betriebsarten und Ausgänge der Sicherheitssteuerung derart zu konfigurieren, so dass die Gesamt-Systemreaktionszeit die zulässige Nachlaufzeit nicht übersteigt.
Einbauposition/QE-Laser	In Verwendung mit HLG werden diese Steuerungselemente aus ergonomischen Gründen (Baugröße, Gewicht) in einen externen mobilen oder stationären Steuerschrank/Steuerbox integriert.

Einbindung in Steuerung	Die Sicherheitssteuerung kann je nach Anforderung allei-nig oder parallel zu einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) eingesetzt werden, um die sicherheits-bezogenen Funktionen (z. B. Laserstopp) zu steuern.

C) Sensoren zur Überwachung der Strahlführung

Mechanik	Die Sensoren sind derart zu montieren, dass sie Kontakt zum Abschirmungswerkstoff haben und somit eine ausrei-chende Wärmeleitung von dem Abschirmungswerkstoff zum Sensor erfolgt. Bei den Untersuchungen wurden die Sensoren mit Hilfe von Wärmeleitkleber (z. B. Epoxidharz-matrix mit Dispersionswerkstoffen auf Metallbasis) auf dem Abschirmungswerkstoff fixiert.
Elektrik/Elektronik	Die Signale der PT100 oder Thermocouple Sensoren müssen durch eine nachgeordnete Schaltungseinheit verarbeitet, ausgewertet und ggf. gewandelt werden. Es bieten sich hier auf die Sensoren bzw. auf deren Signale angepasste Temperaturcontroller an. Diese verfügen über integrierte Grenzwertschalter und können mit den digi-talen Eingängen einer Sicherheitssteuerung verknüpft werden.
Einbauposition/QE-Laser	Es sind mehrere Sensoren verteilt auf den Umfang der Strahlführungsabschirmung zu platzieren, um zeitnah ei-nen (vom Winkel beliebigen) Fehler in der Strahlführung zu detektieren. Es konnten keine Querempfindlichkeiten im Bereich der Laserapplikation beobachtet werden. Je nach Auslegung des Abschirmwerkstoffes und der Grenztemperatur zur Einleitung einer sicheren Abschaltung kann eine mögliche Temperaturkompensation (Kompensation der Temperatur im bestimmungsgemäßen Betrieb) erforderlich sein.
Einbindung in Steuerung	Bei den verwendeten Sensoren handelt es sich um be-währte Bauteile. Die Sensoren sind in eine Steuerung mit diversitärer redundanter Struktur als eine Eingabeeinheit einzusetzen. Zu beachten ist, dass die der vollständigen Kanäle bestehend aus Sensor, Signalbearbeitung, Signal-auswertung und -wandlung (Temperaturcontroller) redun-dant auszuführen sind, um entsprechende Performance Level bzw. Steuerungskategorien zu erreichen.

7.3 Schlussfolgerungen

Anhand der Untersuchungen zur Qualifikation der sicherheitsbezogenen Teile von Steuerungen (SRP/CS) kann geschlussfolgert werden, dass es im Bereich der Sen-soren keine für handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung (HLG) „universell" einsetzbaren Sensoren gibt.

Je nach Bautyp und Anwendung des HLG sind nur bestimmte Sensoren aufgrund ihrer Eigenschaften vorteilhaft einzusetzen. Maßgebliche Eigenschaften der Sensoren sind:

- ihr Wirkprinzip (geeignet für die Verwendung in HLG und die entsprechende HLG-Anwendung)
- keine oder nur geringe Querempfindlichkeiten (bei Verwendung in HLG und die entsprechende HLG-Anwendung)
- möglichst geringe Baugröße und Gewicht
- akzeptable Toleranz gegenüber Prozessfluktuationen im bestimmungsgemäßen HLG-Betrieb (bei der entsprechenden HLG-Anwendung).

Generelle Empfehlungen für einen Sensortyp können daher nicht gegeben werden.

Wie dargestellt, bestehen bei Verwendung von bewährten Bauteilen (hier Sensoren) an die Architektur der Steuerung komplexe Anforderungen; insbesondere bezüglich der Realisierung redundanter Kanäle.

Aus Gründen der Risikominderung bzw. HLG-Sicherheit empfiehlt sich der Einsatz von Sensoren unterschiedlichen Wirkprinzips; d. h. die Beachtung des Prinzips der diversitären Redundanz. Der Einsatz mehrerer Sensoren am HLG-Gehäuse erscheint auch deswegen ohnehin sinnvoll, um sichere Abschaltungen z. B. an möglichen Werkstückkanten zu gewährleisten und kritische Verkippungswinkel des HLG besser zu beherrschen.

Die Signalantwortzeiten aller untersuchten Sensoren sind im Vergleich zu der Systemreaktionszeit der PLC kurz und ihr Beitrag an der Gesamt-Systemreaktionszeit bzw. dem Nachlauf (bis zur Isolierung/Deaktivierung der Laserstrahlung) daher sekundär. Zu berücksichtigen ist die Problematik federbelasteter Stößel bei einer mechanischen Aufsatzkontrolle.

Im Bereich der Strahlführungsüberwachung innerhalb der HLG können PT100 und Thermocouple sinnvoll eingesetzt werden. Entscheidend für die Lasersicherheit ist ein angepasstes Konzept, das die passive Laserresistenz der Strahlführungsabschirmung und die Gesamt-Systemreaktionszeit bis zur Isolierung/Deaktivierung der Laserstrahlung berücksichtigt. Die Untersuchungen haben verdeutlicht, dass mehrere Sensoren auf dem Umfang der Strahlführungsabschirmung angeordnet werden müssen, um mögliche fehlerhafte (in der Richtung unvorhersehbare) Strahllageänderungen zeitnah zu detektieren. Werkstoffe der Strahlführungsabschirmung, die eine größere thermische Beständigkeit bzw. gemäß DIN EN 60825-4 eine höhere Schutzgrenzbestrahlung (SGB) bei gleichzeitig akzeptabler Wärmeleitfähigkeit aufweisen (z. B. Stahl, Aluminium), sind Abschirmwerkstoffen auf Polymerbasis vorziehen.

Entscheidend ist die Definition/Einstellung des Grenzwertes. Ist das Signalverhältnis zwischen bestimmungsgemäßem Betrieb und vorhersehbarer Fehlerbedingung gering (ca. ≤ 20°K), so muss eine Temperaturkompensation (Betriebstemperatur) erfolgen. Dieses bedingt die Verwendung von dynamischen Grenzwertschaltern/Diskriminatoren und bedeutet somit einen höheren Aufwand und damit verbunden höhere Kosten. Besteht aufgrund der thermischen Beständigkeit (bzw. der SGB) des Abschirmwerkstoffes die Möglichkeit, eine absolute Grenztemperatur (z. B. 100 °C) für das Einleiten einer Laserstrahlisolierung einzustellen, kann gegebenenfalls auf eine Temperaturkompensation verzichtet werden.

HLG sollten, wenn anwendungstechnisch möglich (z. B. nicht möglich bei Reparaturschweißen mit manueller Drahtzufuhr), über zwei Zustimmtaster verfügen, um die Hände und die Unterarme des Bedieners vor direkter Laserstrahlung zu schützen (in vorhersehbaren Fehlerbedingungen). Zustimmtaster sind in einer Vielzahl von Typen (Einbau-Version, in Griff integriert) und in diversen Bauteilabmessungen am Markt verfügbar. Für HLG sind 3-stufige Zustimmtaster empfohlen. Hierdurch wird sichergestellt, dass auch bei Panikreaktionen (Durchdrücken des Tasters) die Laserstrahlung sicher isoliert/deaktiviert wird. Nachteilige Effekte von 3-stufigen Zustimmtastern auf die Praxistauglichkeit von HLG konnten nicht beobachtet werden.

Mit der Weiterentwicklung von Sicherheitssteuerungen stehen dem Konstrukteur von HLG eine Reihe verschiedener geeigneter Produkte am Markt zur Verfügung. Je nach erforderlicher Anzahl von Eingängen und Ausgängen können zumeist modular erweiterbare Sicherheits-Kleinsteuerungen sinnvoll für HLG eingesetzt werden.

In Bezug auf die Nachlaufzeit bieten für die überwiegende Anzahl von HLG-Applikationen typische Sicherheits-Kleinsteuerungen eine akzeptable Systemreaktionszeit (im Bereich von 50 ms). Zu beachten ist, dass in Bezug auf die Gesamt-Systemreaktionszeit bzw. den Nachlauf (bis zur Isolierung/Deaktivierung der Laserstrahlung) die Steuerungskomponenten des Lasergerätes (Strahlquelle) mit berücksichtigt werden müssen. Lasergeräteseitige SRP/CS wie Sicherheitsrelais oder Strahlverschlüsse können die Gesamt-Systemreaktionszeit signifikant erhöhen. Die ermittelten Beiträge der Komponenten können mehrere 10 bis 100 ms betragen.

Insbesondere für High-Power-HLG im Multikilowattbereich empfiehlt sich eine Verifizierung der Gesamt-Systemreaktionszeit. Dieses kann dazu führen, dass in Einzelfällen spezielle Steuerungen (PLC) und SRP/CS eingesetzt werden müssen, die kürzere Systemreaktionszeiten aufweisen.

Zusammenfassend kann argumentiert werden, dass eine Reihe geeigneter sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen sowie Sicherheits-Kleinsteuerungen am Markt verfügbar sind, die unter Beachtung der Architektur der Steuerung bzw. des erforderlichen Performance Level in geeigneter Weise für eine Verwendung in HLG kombiniert werden können. Es sollte daher für Konstrukteure von HLG zukünftig (ggf. mit Hilfe eines Software-Tools wie SISTEMA, IFA der DGUV) möglich sein inhärente, d. h. steuerungstechnische Maßnahmen zur sicheren Isolierung der Laserstrahlung in vorhersehbaren Fehlerfällen vorzusehen. Hiermit wird ein Beitrag zur Risikominderung im Umgang mit HLG geleistet.

7.4 Transfer in technische Regelungen/Prüfvorschriften

Ziel ist es, die Projektergebnisse in die entsprechende Typ-C-Norm (Produktnorm), die DIN EN ISO 11553-2, „Sicherheit von Maschinen – Laserbearbeitungsmaschinen – Teil 2: Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte“ einfließen zu lassen. In der DIN EN ISO 11553-2 (Stand 03:2009) sind Anforderungen an die Konstruktion von HLG im Bereich Kontrolleinrichtungen und Schaltungen dahingehend formuliert, dass eine Risikobeurteilung nach ISO 13849-1 erfolgen muss. Es wird der Hinweis gegeben (in Form einer Anmerkung), dass dieses im Allgemeinen in einer Steuerungskategorie 3 oder höher bzw. in korrespondierenden Performance Leveln gemäß ISO 13849-1 resultiert.

Ergänzende und weiterführende Erläuterungen zur technischen Umsetzung, unter anderem an Beispielen in den informativen Anhängen, werden nicht gegeben. Ähnlich zur DIN EN 60825-4 „Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 4: Laserschutzwände“, die in den informativen Anhängen Hilfen zur Konstruktion und Auswahl von Laserschutzwänden sowie zur Prüfung bereitstellt und Beispiele für Eigenschaften verschiedener Laserabschirmmaterialien bietet, könnten weitere informative Anhänge in der DIN EN ISO 11553-2 Hilfen zur Auswahl von sicherheitsbezogenen Teilen der Steuerung und von Sicherheits-Kleinsteuerungen sowie zur Prüfung der Einrichtungen geben (vgl. dazu Anhang 5). Darüber hinaus könnten mögliche Architekturen einer sicheren HLG-Steuerung schematisch dargestellt und erläutert werden.

Defizite bestehen auch bezüglich der Verifizierung von speziellen Eigenschaften sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen sowie der Sicherheitssteuerung als Gesamtsystem. Insbesondere die Nachlaufzeit (Abschaltzeit für die Isolierung der Laserstrahlung) ist ein wichtiger Parameter für die Lasersicherheit von High-Power-HLG. Diesbezüglich sollten wenigstens auf informativer Basis Erläuterungen zur Relevanz der Nachlaufzeit und zu ihrer Ermittlung bereitgestellt werden. Zu diskutieren wäre auch die Definition von normativen Anforderungen an Start/Stopp-Steuerungen und NOT-AUS-Steuerungen, d. h. die Ermittlung von maximal zulässigen Nachlaufzeiten und ihre Verifikation.

Eingebracht wird der Vorschlag für diese Ergänzungen auf Sitzungen der entsprechenden Normengremien. Bezüglich der Fachnorm DIN EN ISO 11553-2 ist dieses auf internationaler Basis das Technische Komitee ISO/TC 172 “Optics and Optical Instruments“ mit dem Subkomitee SC 9 “Electrooptical Systems“ und der untergeordneten Working Group 3 “Safety”. In Deutschland ist die Arbeitsgruppe O18 AK3 „Lasersysteme und Schnittstellen“ für die Fachnorm zuständig.

Vorgestellt wurden die Ergebnisse erstmals in der JWG im Rahmen der IEC/TC 76 Meetings im November 2009 in Kista, Schweden. Ein entsprechender „New Work Item Proposal“ (NWIP) ist derzeit in Vorbereitung.

8 Zusammenfassung

Ausgehend von der wachsenden industriellen Verbreitung von Geräten zur handgeführten und handpositionierten Lasermaterialbearbeitung (HLG) wurde in den in diesem Abschlussbericht beschriebenen Arbeiten eine Reihe offener Fragestellungen hinsichtlich der sicherheitsgerechten Konstruktion sowie des sicheren Betriebes von HLG behandelt. Ziel war es, einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Sicherheit zukünftig zu entwickelnder HLG zu leisten.

Basis der durchgeführten Arbeiten war eine detaillierte Analyse der derzeitigen Situation im Bereich „Sicherheit von handgeführten und -positionierten Lasergeräten zur Materialbearbeitung“, aufgrund derer der Forschungsbedarf definiert wurde. Zu diesem Zweck wurde eine gründliche Recherche der verfügbaren internationalen Patente sowie der zugänglichen nationalen und internationalen Fachliteratur ausgeführt. Darüber hinaus wurden am Markt verfügbare Prototypen betrachtet.

Die Recherche zeigte, dass von den Herstellern oftmals oder sogar überwiegend keine detaillierten Angaben zur Lasersicherheit beim Einsatz von HLG und insbesondere zur Sicherheitssteuerung gemacht werden. Daraus ergaben sich unmittelbar die Defizite bzw. der Optimierungsbedarf hinsichtlich der Lasersicherheit von HLG. Die Defizite betreffen dabei einerseits den bestimmungsgemäßen Betrieb der Geräte, der z. B. mit Aufsatzkontrollen überwacht wird, andererseits insbesondere vorhersehbare Fehlerbedingungen, wie sie in der DIN EN ISO 12100-1 beschrieben sind. Auf HLG bezogen müssen z. B. die besonderen Gegebenheiten des bearbeiteten Werkstücks im Hinblick auf die Möglichkeit direkter Reflexionen an spiegelnden Oberflächen betrachtet werden (Werkstück, Werkstückkante, Werkstückaufnahme, Verkippen des HLG, Abrutschen oder Abgleiten des HLG vom Werkstück etc.).

Auch in der Typ-C Fachnorm DIN EN ISO 11553-2 (Sicherheit von Maschinen – Laserbearbeitungsmaschinen – Teil 2: Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte) sind keine konkreten Anforderungen an die Auslegung und Architektur der Sicherheitssteuerung beschrieben, was den Forschungsbedarf unterstreicht.

Eine detaillierte allgemeine Klassifikation der Gefährdungen bei HLG anhand des Risikographen (vgl. Abb. 3.20) ist in Anhang 2 zu finden. Entscheidend für die erzielbare Sicherheit eines HLG im Hinblick auf die unbeabsichtigte Exposition von Personen bzw. Extremitäten durch Laserstrahlung ist die Steuerung, genauer gesagt die Sicherheitssteuerung und die sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung (SRP/CS). In Abhängigkeit vom Bautyp und von der Anwendung des HLG sind folgende Arbeiten im Rahmen des Projektes durchgeführt worden:

1) Es wurde eine theoretische Analyse von möglichen Fehlerbedingungen (Verkippen, Abheben des HLG) und die Bestimmung maximal zulässiger Bestrahlungswerte für Auge und Haut (MZB_{Auge} und MZB_{Haut}) sowie maximal zulässiger Expositionsdauern jeweils für diverse HLG-Laser, Wellenlängen und Ausgangsleistungen (Diodenlaser mit 50 W bis hin zum Festkörper- oder Faserlaser mit 4 kW) vorgenommen. Auf diese Weise wurden maximale Nachlaufzeiten für die Laserstrahlung (bzw. maximale Gesamtsystemreaktionszeiten für die Isolierung/ Deaktivierung der Laserstrahlung) bestimmt.
   Daraus wurden Anforderungen an konstruktive Sicherheitseinrichtungen von

HLG wie Sensoren, die Logik-/Auswerteeinheit und Aktuatoren abgeleitet:
Des Weiteren wurden Anforderungen an die funktionale Sicherheit der HLG-Sicherheitssteuerung definiert, indem bestimmte Funktionen (sicherheitsbezogene Stopp-Funktion, Start-/Wiederanlauffunktion, Freigabekontrolle/Zustimmtaster, Vermeidung des unerwarteten Anlaufs, Funktion zum Stillsetzen im Notfall) analysiert wurden. Unter Zuhilfenahme des Risikographen gemäß DIN EN ISO 13849-1 wurden schließlich die erforderlichen Performance Level (PL_r) für einzelne Sicherheitsfunktionen bestimmt und in einer Tabelle zusammengetragen.

2) Nach Bestimmung der PL_r-Werte wurden Lösungsansätze für die konstruktiven Sicherheitseinrichtungen von HLG erarbeitet, mit welchen das Ziel erreicht werden kann, die Laserstrahlung sicher zu isolieren bzw. zu deaktivieren. Betrachtete Systemkomponenten waren dabei:

- Positions-/Aufsatzkontrolle
- Lagekontrolle
- Bewegungskontrolle
- Freigabekontrolle/Zustimmtaster
- Strahlführungsüberwachung

Lösungsansätze für eine sichere Steuerung wurden anhand der zuvor ermittelten Anforderungen (Required Performance Level gemäß DIN EN ISO 13849-1 oder Steuerungskategorie gemäß DIN EN 954-1) entwickelt. Demnach bieten sich aufgrund des zur Verfügung stehenden geringen Bauraums im HLG, welcher sich aus ergonomischen Aspekten ergibt, Sensoren an, die Steuerungskategorien kleiner als Kat. 3 aufweisen. Dieses bedingt jedoch komplexe Anforderungen an die Architektur der Steuerung und die Verarbeitung der Signale durch eine programmierbare Logikeinheit (PLC), um die sichere Isolierung bzw. Deaktivierung der Strahlung unter vorhersehbaren Fehlerbedingungen zu gewährleisten.

Es sind redundante Kanäle erforderlich, wobei die diversitäre Redundanz der homogenen Redundanz vorzuziehen ist. Betrachtet wurden insbesondere die Schnittstellen vom HLG zum Lasergerät. Daraus wurden Anforderungen an die Steuerungskomponenten des Lasergeräts abgeleitet.

3) Zentraler Punkt der Arbeiten war schließlich die Untersuchung ausgewählter sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen. Dabei wurden drei Gruppen von Systemkomponenten betrachtet und bewertet:

a) Auflagekontrolle/Abstandskontrolle
   - Mechanische Taster/stößelbetätigt
   - Induktive, kapazitive Sensoren/stößelbetätigt
   - Kontakt-Nadel (kodierter Stromfluss)
   - Berührungslose Sensoren (induktiv, kapazitiv, Ultraschall)

b) Sensoren zur Lage-/Beschleunigungskontrolle
   - MEMS Inklinometer/Accelerometer
     (MEMS= Mikro-elektromechanische Systeme)

c) Sensoren zur Überwachung der Temperatur im Strahlführungssystem
   - PT100
   - Thermocouples

Für ausgewählte Beispiele wurde mit Hilfe des Software-Tools SISTEMA in der Version von 2008 (IFA der DGUV) versucht, die erreichbaren Performance Level (PL) zu bestimmen. Jedoch konnte diese Betrachtung aufgrund der begrenzt verfügbaren sicherheitstechnischen Kenngrößen der Hersteller zur Bestimmung des PL-Wertes (u. a. B_{10d}, $MTTF_d$) nur ansatzweise umgesetzt werden.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden verschiedene spezielle Versuchsaufbauten konzipiert und realisiert, um die sicherheitsbezogenen Bauteile und die gesamte HLG-Sicherheitssteuerung hinsichtlich ihres Verhaltens (u. a. Signalantwortverhalten, Querempfindlichkeiten) und der Eignung für eine Verwendung in HLG zu qualifizieren. Die Ergebnisse wurden zur besseren Übersichtlichkeit in Ergebnismatrizen zusammengefasst.

Im Rahmen des erfolgreich abgeschlossenen Projektes wurden somit grundlegende Daten über die Anforderungen an eine sichere Lasersteuerung bzw. Sicherheitssteuerung für HLG erarbeitet. Durch die sowohl theoretische Betrachtung von Lösungsansätzen als auch die Realisierung einer beispielhaften Sicherheitssteuerung konnten wichtige Informationen über die Eignung verschiedener sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen für den Einsatz bei HLG gewonnen werden. Auch wurden sicherheitsrelevante Fragestellungen, die sich durch die Verknüpfung eines HLG mit einem Lasergerät ergeben (u. a. zur Steuerungskategorie der lasergeräteinternen Steuerung, Schnittstellen, Aspekte des Simmerns), aufgezeigt und erörtert.

Der vorliegende Bericht leistet einen wichtigen Beitrag dazu, dass Konstrukteuren und Herstellern von HLG grundlegende Informationen über die konstruktive Risikominderung hinsichtlich potenziell gefährlicher Laserstrahlung zur Verfügung stehen (vgl. dazu auch die beispielhafte Checkliste in Anhang 6). Bei entsprechender Umsetzung bedeutet dieses auch einen entscheidenden Gewinn für den sicheren Umgang mit HLG (vgl. ebenfalls die beispielhafte Checkliste in Anhang 6).

9 Ausblick

Mit den vorliegenden Projektergebnissen existiert für handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung (HLG) eine umfangreiche Informationsbasis über

- die Beurteilung von Risiken beim Umgang mit HLG,
- Anforderungen an Sicherheitssteuerungen und sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen (SRP/CS),
- die Eignung verschiedenster Sensoren zur Auflage/Kontakt- oder Lage- und Positionskontrolle für die Verwendung in HLG
- die funktionale Sicherheit von beispielhaft erstellten HLG-Sicherheitssteuerungen.

Der vorliegende Bericht gibt Konstrukteuren und Herstellern, aber auch Betreibern von HLG, eine Hilfestellung bei ihrer planerischen wie auch praktischen Tätigkeit zur Risikominderung. Unterstützt wird dieses auch durch den Transfer der Ergebnisse in entsprechende technische Regelwerke.

Durch das Aufzeigen von Anforderungen an Komponenten der Sicherheitssteuerung, die sich erst durch Verknüpfung des HLG mit einem Lasergerät ergeben, wird ein Beitrag zur Sensibilisierung beider Parteien (HLG-Hersteller und Lasergeräte-Hersteller) für sicherheitsbezogene Problemstellungen (Gesamt-Laser-Abschaltzeit, Simmern) bei HLG geleistet.

Mit der fortschreitenden Miniaturisierung von geeigneten Sensoren und der Weiterentwicklung kostengünstiger Sicherheits-Kleinsteuerungen stehen dem HLG-Konstrukteur mittlerweile auch entsprechende sicherheitsgerichtete Hard- und Softwarekomponenten zur Verfügung, die es erlauben, dass je nach Bautyp und Anwendung des HLG steuerungstechnische Lösungen zur sicheren Isolierung/Deaktivierung der Laserstrahlung realisiert werden können.

Durch die Verbreitung dieses Berichts sollen die Konstrukteure und Hersteller ermutigt werden, die zusammengefassten Informationen und Beispiele anzunehmen und bei der konstruktiven Gestaltung neuer HLG tatsächlich umzusetzen.

Weiterer Diskussionsbedarf besteht bezüglich möglicher Prüfvorschriften. Zunächst ist in Fachforen zu klären, welche Kriterien einer besonderen Validierung bedürfen. Beispielhaft sei hier die Nachlaufzeit (oder Systemreaktionszeit) genannt. Bei Bejahung der Notwendigkeit muss dann in nachfolgenden Schritten eine Prüfvorschrift erarbeitet werden. Auch ist zu klären, inwieweit eine derartige Prüfvorschrift in technische Regeln Eingang finden sollte.

Gemäß dem Amtsblatt 2009/C321 der Europäischen Kommission ist die Übergangsfrist der DIN EN 954-1 bis zum 31.12.2011 verlängert worden. Nach diesem Zeitpunkt gilt, dass nur noch die Anwendung der EN ISO 13849-1:2008 die Konformitätsvermutung auslöst. Gründe für die Verlängerung der Übergangsfrist liegen unter anderem in der niedrigen Verfügbarkeit von sicherheitstechnischen Kenngrößen, die zum Berechnen des Performance Level (PL) erforderlich sind; wie u. a. $MTTF_d$, DC_{avg} und *CCF*.

Mit dem Normenwechsel sind jedoch keine Änderungen an dem grundsätzlichen Vorgehen zur Risikominderung und dem Verfahren der Risikobeurteilung verbunden. Auch die Risikoparameter des aus der DIN EN 954-1 bekannten Risikographen blei-

ben annähernd erhalten, d. h. die fünf Steuerungskategorien bleiben vom Grundsatz her bestehen. Diesen werden in der DIN EN ISO 13849-1 allerdings die so genannten Performance Level zugeordnet.

Da die Anforderungen an die Architektur der Sicherheitssteuerung im Wesentlichen aus der geforderten Steuerungskategorie resultieren, ergeben sich auch diesbezüglich keine grundsätzlichen Änderungen.

Es bleibt zu beobachten, wann die Hersteller von sicherheitsbezogenen Teilen von Steuerungen die Kenngrößen, die zur Ermittlung des Performance Levels benötigt werden, bereitstellen. Liegen diese Kenngrößen für einzelne SRP/CS, die im Rahmen der Sicherheitssteuerung für handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung eingesetzt werden, erst einmal vor, so können mit geeigneten Software-Tools die entsprechenden Performance Level ermittelt werden.

Mit dem Software-Assistenten SISTEMA – Sicherheit von Steuerungen an Maschinen – (IFA der DGUV 2010) steht sowohl Entwicklern als auch Prüfern von sicherheitsbezogenen Maschinensteuerungen ein derartiges Werkzeug zur Verfügung, um die erforderliche und erreichte Sicherheit der Steuerung zu bewerten. Der Software-Assistent SISTEMA wird auf den Internetseiten des IFA der DGUV nach Registrierung als freier Download in deutscher Sprache bereitgestellt.

Das Software-Tool erlaubt, die Struktur der sicherheitsbezogenen Steuerungsteile auf der Basis der so genannten vorgesehenen Architekturen nachzubilden und die nachfolgende Berechnung der Zuverlässigkeitswerte einschließlich des erreichten Performance Levels (PL) durchzuführen.

Angesichts einer kontinuierlichen Weiterentwicklung in den Teilbereichen

- Miniaturisierung von Sensoren
- Verfügbarkeit kostengünstiger Sicherheits-Kleinsteuerung
- Bereitstellung von Sicherheitskenngrößen für SRP/CS durch die Hersteller und
- Verfügbarkeit von Softwaretools zur Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen (u. a. PL)

bestehen günstige Rahmenbedingungen, um sicherheitstechnische Maßnahmen bei der Konstruktion von handgeführten und -positionierten Geräten zur Lasermaterialbearbeitung zu implementieren, wie sie in diesem Bericht beschrieben werden.

Konstrukteure und Hersteller von HLG sollten bereits in der Planungsphase die hier erarbeiteten Informationen nutzen, um einen möglichst hohen Grad der Risikominderung für das zu erstellende HLG zu erreichen.

HLG, die bei der Anwendung für den Bediener und weitere Personen ein überschaubares – weil nur geringes – Restrisiko darstellen, erhöhen zum einen die Akzeptanz dieser Werkzeuge und sichern zum anderen somit den weiteren Erfolg dieser Geräte am Markt.

10 Literaturverzeichnis

[AGN05] Agnoletti, S.; Brini, A.; Nicolai, L.: Current work in Laser cleaning of the Porta del Paradiso. LACONA VI, 2005, Berlin u. a.: Springer, 2007

[ALB98] Albert, S.: Reparaturschweißen an Werkzeugen mittels Laserstrahl. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 1998. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 1998

[ASM99] Asmus, John F.: Laser restoration of the medieval sculpture of the cremona cathedral. In: Congress Proceedings ICALEO 99, Editor: LIA, 1999, S. F11-F12

[BAE06] Baeger, H., Mergenthaler, D.: Der Weg zur mobilen Laserbeschriftung. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2006

[BAR06] Barkhausen, W.: Sicherheit bei handgeführter Laserstrahl-Reinigung. In: Tagungsband Sicherheit bei der Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg.: BGFE, Köln, 2006

[BEL03] Belforte, D.: World markets for industrial lasers and applications. In: Proceedings of the lasers and optoelectronics marketplace seminar, San Jose, CA, USA, 2003

[BER04] Berend, O.; Haferkamp, H.; Ostendorf, A. et. al.: Analyse der Voraussetzungen zum handgeführten Laserstrahlhärten von Umformwerkzeugen. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2004. Halle, Hrsg.: SLV Halle, S. 41-48

[BMBF09] Forschung und Innovation für Deutschland – Bilanz und Perspektive. Hrsg.: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat 111 – Innovationspolitische Querschnittsfragen, Bonn u. a.: Bertelsmann, 2009, S. 61-62

[BRU02] Brüninghoff, H.: Schicht für Schicht – Laserstrahlreinigen von Hochspannungsmasten. In: Tagungsband Aachener Kolloquium für Lasertechnik, 18.-20. September 2002, Augsburg, Hrsg.: Grütter, 2002, sowie in: Euro-Laser 4/2002, S. 38 ff

[BUE98] Büchter, E.: Manuelles Reinigen und Abtragen mit Laserstrahlung - Einsatzmöglichkeiten und Grenzen. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 1998. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 1998

[BUT98] Butthoff, H.; Orlick, H.: Tragbare Ausrüstung zum mechanisierten Laserschweißen kurzer Nähte - Das „Laserhandschweißgerät“ LHSG-1. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 1998. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 1998

[COO05] Cooper, M.; Sportum, S.: The application of laser cleaning in the conservation of twelve limestone relief panels on St. George´s hall. LACONA VI, 2005, Berlin u. a.: Springer, 2007

[EXN99] Exner, H.; Drechsel, J.; Neumann, V.; Kloetzer, S.: Laser material processing with a hand-held laser head fiber coupled with a high-power diode laser with an output power of 1.4.kW on the work piece. In: Congress Proceedings ICALEO 99, Editor: LIA, 1999, S. 28-31

[EXN06] Exner, H.; Drechsel, J.; Heinisch, J.: Handgeführtes Punktschweißen mit Nd:YAG-Laser. In: Tagungsband zum Kolloquium "Laserstrahl-Handbearbeitung", 2006. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2006

[FRA05] Frantzikinaki, K.; Marakis, G.; Panou, A.; et.al.: The cleaning of the parthenon west frieze by means of combined IR-and UV-radiation. LACONA VI, 2005. Berlin u. a.: Springer, 2007

[GRU08] Gruber; H.; Kittelmann, M. Mierdel, B.: Leitfaden für die Gefährdungsbeurteilung. (2008), Verlag Technik&Information, ISBN 978-3-934966-75-8

[GUE04] Guenter, M.; Grieger, J.: Mobile Laserhandschweißgeräte – Weiterentwicklungen und Anwendungen. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2004. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2004

[HAF98] Haferkamp, H.; Goede, M.; Drygalla, M.: Hand-guided laser material processing: recent developments and safety aspects. In: Congress Proceedings ICALEO 98, Editor: LIA, S. A167-74

[HAF00] Haferkamp, H., Schmid, C., Goede, M. et. al.: Handgeführtes Schneiden und Schweißen mit Nd:YAG-Hochleistungslasern. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2000. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2000

[HAF02] Haferkamp, H.; Berend, O. et al.: Neue Lösungsansätze in der Sicherheitstechnik von Handlasersystemen. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2002

[HAF02a] Haferkamp, H.: Forschungsbericht: Handgeführtes Werkzeugsystem zur lasergestützten Bearbeitung von Schneid- und Umformwerkzeugen, FKZ: AIF 13682 N1

[HAF04] Haferkamp, H.; Drygalla, M.; Bunte, J.; von Busse, A.: Modularized laser beam cutting technology for dismantling applications. (IE-377-04) CI-1150-04, Welding in the World 51 (2004) 9, S. 17-23

[HAF06] Haferkamp, H.; Meier, O.; Kallage, P. et. al.: Geräte- und Prozessentwicklungen für handgeführte Bearbeitungsköpfe zum Härten und Schneiden. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2006, S. 53-62

[HAU98] Haussmann, D.: Automatisierung eines Laserstrahlhandarbeitsplatzes. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 1998. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 1998

[HAU08] Hauke, M.; Schaefer, M.; Apfeld, R.; Bömer, T. et. al.: Funktionale Sicherheit von Maschinensteuerungen, BGIA-Report 2/2008, Hrsg. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V., Sankt Augustin

[HEN04] Henderson, R.; Schulmeister, K.: Laser Safety, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2004

[HEN06] Hennigs, C.; Meier, O.; Ostendorf, A.; Haferkamp, H.: Multifunctional hand-held laser processing device. In: Congress Proceedings ICALEO 98, Editor: LIA, 2006, S. 248-254

[HER41] Herig, F.: Leistungssteigerung durch richtigen Griff. In: Mitteilungen der Werkstätte für Griff-Forschung. Karlsruhe, 1941

[HEY00] Heyse, Th.: Laserstrahl-Handbearbeitung mit einem mobilen Laserschweißgerät – SAM 1001. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2000. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2000

[HEY02] Heyse, Th.: Möglichkeiten der Prozessintegration von mobilen Laserhandschweißsystemen in Industrie und Handwerk. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2002

[JAS02] Jasnau, U.; Hoffmann, J.; Seyffarth, P.: Möglichkeiten der Laserstrahl-Handbearbeitung im Schiffbau. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2002

[JAS06] Jasnau, U.; Schmid, C.; Lotz, K.-U. et. al.: Mobiles Schneiden und Schweißen mit Hochleistungsfaserlaser – Traktorsysteme mit angepassten Bearbeitungsköpfen. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2006

[JAS06a] Jasnau, U.: Innovationsforum "Mobile und Variable Lasersysteme" - Neue Einsatzgebiete der Lasertechnologie in der Materialbearbeitung, 22.-23. Februar 2006, Rostock

[JAS08] Jasnau, U.; Möller, T.; Sumpf, A.; Wiegmann, M.; Klahr, H. & Jäkel, S.: Neue Entwicklungen beim Einsatz mobiler Lasertechnik an Großstrukturen, insbesondere im Schiffbau. In: 6. Kolloquium Mobile Laserbearbeitung, 16. April 2008, S. 7-19

[JUR00] Juraschik, A.; Langhans, L.; Mayerhofer, R.: Manuelles Laserauftragschweißen mit Zusatzdraht für Anwendungen des Werkzeug- und Formenbaus. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2000. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2000

[KEI98] Keitel, S.: Das Potential der Lasertechnik für die Handbearbeitung am Beispiel der Schweißtechnik. In: Tagungsband 1. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 1998. Halle, Hrsg: SLV Halle, 1998

[KIM06] Kimme, T.; Ochlich, H.-M.: Laserstrahl-Handbearbeitung – Erfahrungen aus 12 Jahren Praxis in Schweiß- und Auftragschweißanwendungen. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2006

[KNE00] Knechtel, H.: Laserschweißen im Werkzeug- und Formenbau – Möglichkeiten und Grenzen. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2000. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2000

[KNE02] Knechtel, H.: Der Laser – Handarbeitsplatz im Werkzeug- und Formenbau. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2002

[KNE06] Knechtel, H.: Einzelteil oder Serienfertigung – Die Gestaltungsmöglichkeiten eines Laser-Handarbeitsplatzes vom Basisgerät zum NC-gesteuerten 4-Achs-Bearbeitungszentrum. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2006

[KOS05] Koss, A.; Marczak, J.; Strzelec, M.: Experimental investigations and removal of encrustations from interior stone decorations of King Sigismund´s Chapel at Wawel Castle in Cracow. LACONA VI, 2005, Berlin u. a.: Springer, 2007

[KRA06] Krause, S.: Handgeführte Lasersysteme zur Laserbeschriftung und -reinigung. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2006

[MAY09] Mayer, A.: Economic Downturn Hits Laser Market at Record High. In: Laser Technik Journal, 3/2009, S. 8-9

[MEI08] Meier, O.; Püster, T.; Beier, H.; Wenzel, D.: Qualifizierung von persönlicher Schutzausrüstung für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung. Abschlussbericht, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Forschungsprojekt F 2117, Berlin/Dortmund/Dresden, 2008

[MOR47] Moritz, A.R., Henriques, F.C.: Studies of thermal injury: the relative importance of time and surface temperature in the causation of cutaneous burns (Part II). In: Am. J. Path. 23 (1947), S. 695-720

[NEU04] Neubert, J.: Einsatzpotenziale von Hochleistungsfaserlasern im Hinblick auf mobile Laserapplikationen. In: Tagungsband 4. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2004. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2004

[ORL02] Orlick, H.: Spezifische Anforderungen an die Laserstrahl-Handbearbeitung. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2002

[ORL06] Orlick, H.: Neue DVS-Richtlinien und DVS-Richtlinienentwürfe zur Personalqualifizierung für die Laserstrahl-Handbearbeitung. In: Tagungsband Sicherheit bei der Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg.: BGFE, Köln, 2006

[PAN06] Panzner, M.: Einsatz mobiler Lasertechnik zur Reinigung in der Restaurierung. In: Tagungsband 5. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2006

[PET06] Pethan, G.: DockLaser – Ziele und Potentiale mobiler Laserfertigungskonzepte im Schiffbau. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2006

[PUE02] Püster, T.; Baur, R.: Normungsarbeit für Maschinen zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung. In: Tagungsband 3. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2002

[PUE05] Püster, T.; Berend, O.; Drygalla, M.; et al.: Safety requirements for handheld laser processing devices – current status of ISO 11553-2. Proceedings: International Laser Safety Conference - ILSC, 7.-10. März 2005, Marina del Ray, California, USA. editor/publisher: LIA. S. 260-268

[RAS06] Rasmussen, C., Jasnau, U.: Sicherheit im Projekt DockLaser. In: Tagungsband Sicherheit bei der Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg.: BGFE, Köln, 2006

[ROT06] Rothweiler, M.: Sicherheitstechnik handgeführter bzw. offener Lasersysteme in der Industrie. In: Tagungsband Sicherheit bei der Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg.: BGFE, Köln, 2006

[SAL03] Salimbeni, R.; Pini, R.; Siano, S.: The project OPTOCANTIERI. LACONA V, 2003, Berlin u. a.: Springer, 2005

[SCH87] Schmidt, R. F.; Thews, G.: Physiologie des Menschen, 23. Ausg., Springer, Berlin, 1987

[SCH01] Schmid, C.: Ungewohnte Freiheitsgrade. In: Laser 4/2001, S. 12-13

[SCH02] Schmid, C.: Handgeführte Lasersysteme für die cw-und pw-Materialbearbeitung. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2002

[SCH04] Schmid, C.: Flexible Lasermaterialbearbeitung mit fasergekoppelten gepulsten und Dauerstrich-Lasern. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2004. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2004

[SCH06] Schmid, C.: Überblick über Geräte und Anwendungen handgeführter und teilmechanisierter Laserbearbeitung. In: Tagungsband 5. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2006

[STI59] Stier, F.: Über die Geschwindigkeit von Armbewegungen unter besonderer Berücksichtigung der Einlegearbeit an Pressen. Dissertation Universität Hannover, 1959

[STO68] Stoll, A.M.; Chianta, M.A.: Burn Production and Prevention in Convective and Radiant Heat Transfer. In: Aerospace Medicine 39 (1968), S. 1097-1100

[STO69] Stoll, A.M.; Chianta, M.A.: Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection. In: Aerospace Medicine 40 (1969), S. 1232-1238

[STR03] Strzelec, M., Marzczak, J.; Ostrowski, R.; et.al.: Results of Nd:YAG laser renovation of decorative ivory jug. LACONA V, 2003, Berlin u. a.: Springer, 2005, S. 126-127

[SUT02] Sutter, E.: Schutz vor optischer Strahlung. 2. Auflage: VDE Verlag, 2002, ISBN 3-8007-2667-X

[WAG98] Wagner, W.-D.: Mobile Reinigungslaser. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 1998. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 1998

[WEK95] Weks, C.: the conservation of the portail de la Mere dieu, Amiens cathedral, France. LACONA I, 1995, Wien: Meyer & Comp., 1997

[WIE95] Wiedemann, G.: Experiences in the removal of thin layers and in the cleaning of artworks by means of Nd:YAG pulse laser. LACONA I, 1995, Wien: Meyer & Comp., 1997

[WIE03] Wiedemann, G.; Pueschner, K.; Wust, H.; Kempe, A.: The potential of the laser application for selective cleaning and the removal of different layers on wooden artworks. LACONA V, 2003, Berlin u. a.: Springer, 2005, S. 45-50

Patentschriften

Patent-Nr.	Patent-Titel	Erfinder	Offenlegungsdatum	Patent erteilt
DT 24 18 064 A1	Handschneidemaschine	Rother, Werner, Dipl.-Phys. Dr. rer. nat.	23.10.1975	erteilt/abgelaufen
US 42 37 364 A	Welding tool and method	Lemelson, Jerome H.	02.12.1980	erteilt
DE 29 43 107 C2	Verfahren zum Entrosten	Langen, Robert	26.07.1984	erteilt/abgelaufen
DE 39 38 029 A1	Mobile Laser-Schneideeinheit	Tietz, Werner	02.08.1990	erteilt/abgelaufen
DE 39 06 336 A1	Handwerkzeugmaschine mit einer Trennvorrichtung	Pauser, Herby	30.08.1990	nicht erteilt
DE 42 12 393 A1	Lichtleiter-Laserbehandlungsvorrichtung	Okagami, Yoshihide; Odaka, Masaki	10.12.1992	erteilt/abgelaufen
EP 06 77 402 A1	Vorrichtung zum Entfernen einer Schicht aus Lack oder Kunststoff mittels eines Laserstrahls	Klupp, Alexander, Dipl.-Ing.; Kalkert, Peter, Dr.; Jetter, Heinz Leonard, Dr.; Schulz, Arnulf, Dr.	15.10.1995	unbekannt
AT 401 246 B	Vorrichtung zum Bearbeiten eines Werkstückes mit einem Laserstrahl	Schuöcker, Dieter, Dr. Dipl.-Ing.	25.07.1996	erteilt
DE 195 19 150 A1	Laserstrahlgerät und Verfahren zur Bearbeitung von Werkstücken	Schlüter, Holger, Dipl.-Phys.; Zwick, Axel, Dipl.-Ing.; Wissenbach, Kurt, Dr. rer. nat.	12.12.1996	nicht erteilt
DE 196 15 633 C1	Verfahren und Vorrichtung zum handgeführten Bearbeiten von Werkstücken mittels Bestrahlung, insbesondere mit Laserstrahlung	Barkhausen, Winfried, Dr. rer. nat.; Büchter, Edwin, Dipl.-Ing.; Schlüter, Holger, Dipl.-Ing.; Zefferer, Hartmut, Dipl.-Ing.; Wissenbach, Konrad, Dr. rer. nat.	30.04.1997	erteilt/läuft
JP 09300088 AA	Handy type laser beam machine	Onodera, Hiroshi	26.08.1997	unbekannt
JP 09220688 AA	Handy laser beam machining head	Onodera, Hiroshi	25.11.1997	unbekannt
DE 196 36 458 C1	Manuell zu positionierende und zu betätigende Einrichtung zum Laserstrahlschweißen	Keitzel, Steffen, Dr.; Ströfer, Martin, Dr.; Butthoff, Hendrik; Orlick, Henry	02.04.1998	erteilt/läuft
DE 198 17 629 A1	Laserbearbeitungsvorrichtung zum Fügen und/oder Beschichten von Werkstücken sowie Verfahren zum Fügen und/oder Beschichten von Werkstücken	Luig, Klaus, Dipl.-Ing.; Höfemann, Matthias, Dipl.-Ing.;Schmid, Christian, Dipl.-Ing.; Lotz, Kai Uwe, Dipl.-Ing.	14.10.1999	erteilt/abgelaufen
DE 198 17 434 A1	Handgeführter Laserbearbeitungskopf	Goede, Martin; Seebaum, Dirk; Drygalla, Michael; Loebnitz, Christof; Kistmacher, Harald	21.10.1999	nicht erteilt

Patent-Nr.	Patent-Titel	Erfinder	Offenlegungsdatum	Patent erteilt
DE 198 39 482 A1	Materialbearbeitungssystem mittels Hochleistungsdiodenlaser	Farnusch, Kurosch; Seifert, Ulf, Dr.; Michel, Günther, Dr.; Heyse, Thomas	09.03.2000	erteilt/läuft
DE 298 15 556 U1	Materialbearbeitungssystem mittels Hochleistungsdiodenlaser	Farnusch, Kurosch; Seifert, Ulf, Dr.; Michel, Günther, Dr.; Heyse, Thomas	25.02.1999	Gebrauchsmuster erteilt/läuft
US 2000/6160835 A	Hand-held marker with dual output laser	Kwon, Young Key	12.12.2000	erteilt
DE 100 05 592 C1	Hand- und maschinenführbares Laserwerkzeug zur Bearbeitung von Werkstücken	Exner, Horst, Prof. Dr.-Ing.; Klötzer, Sascha, Dipl.-Ing.; Ebert, Robby, Dipl.-Phys.; Drechsel, Jan, Dipl.-Ing.; Neumann, Volker, Dipl.-Ing.	04.10.2001	erteilt/abgelaufen
DE 100 59 246 A1	Schutzeinrichtung für ein handgeführtes Laser-Materialbearbeitungsgerät, sowie handgeführtes Gerät und Verfahren zur Laser-Materialbearbeitung, insbesondere zur Laserbeschriftung	Schmitt, Nikolaus-Peter, Dr. rer. nat.	13.06.2002	erteilt/läuft
DE 101 26 034 C1	Handgeführte Vorrichtung zur Laserbearbeitung	Busch, Matthias, Dipl.-Ing.; Schmid, Christian, Dipl.-Ing.; Lotz, Kai-Uwe, Dipl.-Ing.	05.12.2002	erteilt/läuft
CA 2475402 A1	Hand-held powder-fed laser fusion welding torch	Baker, Martin C.; Winchester, Gary; Renteria, Federico; Papotto, Vincent J.; Hehmann, William F.; Haraz, Richard F.	14.08.2003	unbekannt
US 2005/0103756 A1	Hand-held laser welding wand filler media delivery systems and methods	Baker, Martin C.; Chung, Vincent; Renteria, Federico; Hehmann, William F.	19.05.2005	erteilt
US 2006/0175307 A1	Hand-held laser welding wand with improved optical assembly serviceability features	Hughes, Thomas M.; Taylor, Clyde R.	10.08.2006	unbekannt
US 2006/0175308 A1	Hand-held laser welding wand gas lens	Hughes, Thomas M.; Taylor, Clyde R.	10.08.2006	erteilt
US 2007/0151957 A1	Hand-held laser welding wand nozzle assembly including laser and feeder extension tips	Hughes, Thomas M.; Taylor, Clyde R.; Brown, James N.	05.07.2007	unbekannt
DE 102 55 747 A1	Laseranordnung zur Bearbeitung, insbesondere Beschriftung von Werkstückoberflächen	Baeger, Holm, Dr.-Ing.; Mergenthaler, Detlef, Dr.	09.06.2004	noch im Verfahren
US 2007/010069 A1	Hand-held laser cutting apparatus and method using same	Bushroe, Frederick N.; Khan, Mohamed H.; Walters, Craig T.	11.01.2007	noch im Verfahren

11 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1 Anwendungsbereiche von HLG 10
Abb. 3.1 Schutzmaßnahmen (nach DIN EN ISO 12100-1) 23
Abb. 3.2 Iterativer Prozess zur hinreichenden Risikominderung 25
Abb. 3.3 Bauarten von HLG, ihre Klassifizierung gemäß DIN EN 60825- und daraus resultierende Anforderungen an Schutzmaßnahmen 26
Abb. 3.4 Strahlverlauf nach einer fokussierenden Optik 28
Abb. 3.5 Strahlverlauf nach einer fokussierenden Optik (schematisch) [SUT02] 29
Abb. 3.6 Diffus und gerichtet reflektierte Laserstrahlung [HEN04] 30
Abb. 3.7 Typische Abstände von der Bearbeitungsposition zu Körperteilen beim Umgang mit HLG 30
Abb. 3.8 HLG mit Abschirmung und Zustimmschalter(n) 33
Abb. 3.9 VMB für verschiedene Lasertypen und strahlformende Optiken (Brennweite) 34
Abb. 3.10 Maximal zulässige Expositionszeiten für verschiedene Lasertypen und strahlformende Optiken (Brennweite) 35
Abb. 3.11 Maximal zulässige Nachlaufzeiten t_1 für verschiedene Abstände vom HLG-Handgriff (Zustimmschalter) bis zur Zone/zum Punkt der Laserstrahlungsexposition für verschiedene Greifgeschwindigkeiten 36
Abb. 3.12 Einseitige Verkippung des HLG um einen Winkel $\alpha < \alpha_{krit}$ 38
Abb. 3.13 Einseitige Verkippung des HLG um einen Winkel α_{krit} 38
Abb. 3.14 Verkippung des HLG um Mittellage um einen Winkel α und Abheben um eine Distanz d 40
Abb. 3.15 Kritischer Verkippungswinkel α_{krit} in Abhängigkeit vom Spaltmaß d für ein beispielhaftes HLG 41
Abb. 3.16 Greifbewegung und -strecke bei einer einseitigen Verkippung des HLG um einen kritischen Winkel α_{krit} 42
Abb. 3.17 Greifbewegung und -strecke bei einer einseitigen Verkippung des HLG um einen kritischen Winkel α_{krit} und Abheben um eine Distanz d_{krit} 43
Abb. 3.18 Maximal zulässige Nachlaufzeiten t_1 für Szenario 2a (einseitiges Verkippen) in Abhängigkeit der Greifgeschwindigkeit für ein beispielhaftes HLG 44
Abb. 3.19 Maximal zulässige Nachlaufzeiten t_1 für Szenario 2b (Verkippen um Mittellage und Abheben) in Abhängigkeit der Greifgeschwindigkeit für ein beispielhaftes HLG 45
Abb. 3.20 Risikograph zur Bestimmung des PL_r für jede Sicherheitsfunktion gemäß DIN EN ISO 13849-1 46
Abb. 4.1 Schematische Darstellung einer Sicherheitsfunktion, die von SRP/CS ausgeführt werden 51
Abb. 4.2 Iterativer Prozess der notwendigen Sicherheitsfunktionen, die durch die sicherheitsbezogene Teile einer Steuerung ausgeführt werden 53
Abb. 4.3 Beispiel eines sicherheitsbezogenen Blockdiagramms 57
Abb. 4.4 Vorgesehene Architektur für Kategorie 3 57
Abb. 4.5 Vorgesehene Architektur für Kategorie 4 58

Abb. 4.6	Beispiel eines sicherheitsbezogenen Blockdiagramms für eine sicherheitsbezogene Stoppfunktion	60
Abb. 5.1	Versuchsträgermodul	61
Abb. 5.2	Anwendung von Maßnahmen (außer denen für Energietrennung und -ableitung), zur Vermeidung eines von zufällig erzeugten Start-Befehlen verursachten unerwarteten Anlaufs	72
Abb. 5.3	Schematische Darstellung einer Zweihandschaltung gem. DIN EN 574 (ISO 13851)	75
Abb. 5.4	Auf der Schwenkplatte montierter Funktionsträger	89
Abb. 5.5	Auf der Schwenkplatte montierter Funktionsträger beim Schwenken	90
Abb. 5.6	Versuchsaufbau zur Qualifizierung von Sensoren zur Positions-/Auflagekontrolle sowie zur Lage-/Beschleunigungs-kontrolle	91
Abb. 5.7	Versuchsaufbau zur Qualifizierung von Sensoren zur Lage-/ Beschleunigungskontrolle in der Praxisanwendung	92
Abb. 5.8	Versuchsaufbau zur Qualifizierung ausgewählter Sensoren bei der Lasermaterialbearbeitung	93
Abb. 5.9	Versuchsaufbau zur Qualifizierung ausgewählter Sensoren zur Überwachung der Strahlführung	94
Abb. 5.10	Versuchsaufbau zur Qualifizierung ausgewählter Sensoren zur Überwachung der Strahlführung (Einfluss der Winkellage)	95
Abb. 5.11	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Qualifizierung ausgewählter Sensoren zur Überwachung der Strahlführung	95
Abb. 6.1	Antwortsignale des Tasters (Stößel)	96
Abb. 6.2	Antwortsignal des induktiven Sensors (berührungslos)	97
Abb. 6.3	Antwortsignal des kapazitiven Sensors (berührungslos)	97
Abb. 6.4	Antwortsignal des Ultraschall-Sensors (berührungslos)	98
Abb. 6.5	Analoges Antwortsignal des Lagesensors	98
Abb. 6.6	Analoge Antwortsignale des Beschleunigungssensors (Winkelbeschleunigung) für unterschiedliche Beschleunigungen/Bewegungen mit dem HLG	99
Abb. 6.7	Antwortsignale des kapazitiven Sensors im Vergleich zum induktiven Sensor für eine ebene Oberfläche eines Al-Bleches; links: $F \neq 1$, $s_n = 1{,}2$ mm, rechts: $F = 1$, $s_n = 1{,}2$ mm	100
Abb. 6.8	Antwortsignale des kapazitiven Sensors im Vergleich zum induktiven Sensor für eine ebene Oberfläche eines Al-Bleches; $F = 1$, $s_n = 4{,}8$ mm	101
Abb. 6.9	Antwortsignale des kapazitiven Sensors im Vergleich zum induktiven Sensor für eine Warzenblech-Oberfläche eines Al-Bleches; links: $F \neq 1$, $s_n = 1{,}2$ mm, rechts: $F = 1$, $s_n = 1{,}2$ mm	102
Abb. 6.10	Antwortsignale des kapazitiven Sensors im Vergleich zum induktiven Sensor ($F \neq 1$, $s_n = 4{,}8$ mm)	102
Abb. 6.11	Antwortsignale des kapazitiven Sensors bei einer mit Wasser benetzten Oberfläche	103
Abb. 6.12	Antwortsignal des Beschleunigungssensors beim Abrutschen des HLG von der Bauteilkante	104

Abb. 6.13 Antwortsignal des Beschleunigungssensors beim Bewegen des HLG über eine glatte ebene Oberfläche (oben) und über eine Oberfläche mit Werkstückanhaftungen (unten) 105
Abb. 6.14 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (eingestrahlte Leistung: 500 W, Anstellwinkel: 0°) 108
Abb. 6.15 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 500 W, Anstellwinkel: 0°) 108
Abb. 6.16 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 2000 W, Anstellwinkel: 0°) 109
Abb. 6.17 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 500 W, Anstellwinkel: 10°) 109
Abb. 6.18 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (koll. Str.; Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 500 W, Anstellwinkel: 0°) 110
Abb. 6.19 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (koll. Str.; Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 2000 W, Anstellwinkel: 0°) 111
Abb. 6.20 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (koll. Str.; Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 500 W, Anstellwinkel: 10°) 111
Abb. 6.21 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (koll. Str.; Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 2000 W, Anstellwinkel: 10°) 112
Abb. 6.22 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (koll. Str.; Bereich bis 10 s; eingestrahlte Leistung: 1400 W, Anstellwinkel: 0°) 113
Abb. 6.23 Analoges Antwortsignal verschiedener Temperatursensoren (koll. Strahl; eingestrahlte Leistung: 50 W, Anstellwinkel: 10° oben: Bereich bis 100 s; unten: Bereich bis 10 s. 114

12 Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Technische Daten verwendeter HLG und Strahlquellen	31
Tab. 3.2	Annäherungsgeschwindigkeiten des Körpers oder von Körperteilen nach DIN EN 999:2008	32
Tab. 5.1	Matrix von Sensoren/Sensorsystemen bzw. sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen (ausgewählte und qualifizierte Sensoren: rot markiert)	62
Tab. 5.2	Liste der Typen von Zweihandschaltungen und der Mindest-Sicherheitsanforderungen	76
Tab. 5.3	Einteilung der Zustimmschalter	77
Tab. 5.4	Von den Herstellern angegebene Daten	88
Tab. 6.1	Prüf- und Ergebnismatrix von Sensoren zur Auflagekontrolle	106
Tab. 6.2	Prüf- und Ergebnismatrix von Sensoren zur Lage- und Beschleunigungskontrolle	107
Tab. 6.3	Signallaufzeiten nach verschiedenen funktionalen Blöcken der Steuerung (Abheben)	116
Tab. 6.4	Signallaufzeiten am Ausgang der Sicherheits-Kleinsteuerung (Neigen)	117
Tab. 6.5	Systemreaktionszeiten der Sicherheits-Kleinsteuerung (Protect-PSC-CPU-MON)	119

13 Abkürzungen und Formelzeichen

A	Absorptionsgrad
AK	Arbeitskreis
$BaSO_4$	Bariumsulfat
BG	Berufsgenossenschaft
BGI	Berufsgenossenschaftliche Information
BGV	Berufsgenossenschaftliche Vorschrift
β	Winkel, Reflexionswinkel
C	Korrekturfaktor
CEN	European Committee for Standardization (Europäisches Komitee für Normung)
CO_2	Kohlenstoffdioxid (Lasergas)
cw	Continuous wave (Dauerstrich-Betrieb)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
d	Durchmesser
d_{kol}	Durchmesser des kollimierten Strahls
d_s	Durchmesser des Bestrahlungsflecks am Schutzsystem
D	Distance (Abstand)
E	Bestrahlungsstärke
$E_{MZB_{Haut}}$	maximale Bestrahlungsstärke der Haut in W/m²
E_{VMB}	Vorhersehbare maximale Bestrahlungsstärke in W/m²
EN	Europäische Norm
EG	Europäische Gemeinschaft
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
f	Fokusabstand (Brennweite)
FR	Flame-resistant (Flammhemmend)
FTIR	Fourier-Transformations-IR (Spektroskopie)
GZS	Grenzwert zugänglicher Strahlung
$grad\ \vartheta$	Temperaturgradient
H	Bestrahlung
HLG	handgeführtes oder -positioniertes Lasergerät zur Materialbearbeitung
HR	hochreflektierend (Spiegel mit hochreflektierender Oberfläche)
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
j_q	Wärmestromdichte
λ	Wellenlänge
L	spektrale Strahldichte
LASER	Light amplification by stimulated emission of radiation (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung)
M	spezifische Ausstrahlung (eines schwarzen Strahlers)
MIR	Mittlere infrarote Strahlung
Mrd	Milliarde
MTBF	Mean Time Between Failure
$MTTF_d$	Mean Time To Failure (dangerous)
MZB	Maximal zulässige Bestrahlung
MZB_{Haut}	Maximal zulässige Bestrahlung der Haut

Nd:YAG	Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat (Laserkristall)
NIR	Near infrared radiation (Nahe infrarote Strahlung)
NOHD	Nominal Ocular Hazard Distance, Sicherheitsabstand
P	Leistung, Strahlungsleistung in W
PAN	Polyacrylnitril (Faser)
PC	Personal Computer
P_M	maximale Ausgangsleistung
P_m	mittlere Ausgangsleistung
PREOX®	preoxidiertes Polyacrylnitril (Faser)
PU	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid (Kunststoff)
$d\Omega/dt$	Schädigungskonstante (Haut)
Φ	Strahlungsfluss
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
r	Abstand
R	Reflexionsgrad
R	Gaskonstante
RL	Richtlinie
δ	Divergenz
SC	Subcommittee
SGB	Schutzgrenzbestrahlung
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante
t	Zeit
T	Transmissionsgrad
TC	Technical committee
$T_{max\ (v)}$	Temperatur
TEM_{00}	Transversaler elektromagnetischer Grundmode, Gaußmode
UV	Ultraviolett
VIS	visible (sichtbarer Spektralbereich)
VMB	vorhersehbare Maximalbestrahlung
WG	Working Group
ZNS	Zentrales Nervensystem

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Dr. E. Romanus und Herrn Dipl.-Ing. G. Ott (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin – BAuA, Dortmund) für die gute Betreuung und Unterstützung während der Durchführung dieses Forschungsvorhabens.

Des Weiteren danken die Autoren allen am Projekt beteiligten Partnern, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. T. Bömer (Institut für Arbeitsschutz – IFA – der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung – DGUV, Sankt Augustin), Herrn Dipl.-Phys. M. Brose und Herrn Dipl.-Ing. D. Engelmann (Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse – BG ETEM, Köln/Dresden) sowie Herrn Dipl.-Ing. J. Grohs (ProLas GmbH, Würselen) für die Anregungen und Kommentare zur Durchführung des Forschungsprojektes sowie zur Veröffentlichung der Ergebnisse.

Anhang 1 Hersteller von HLG und Dienstleister

Anh. 1, Tab. 1 Hersteller von HLG und Dienstleister (Auswahl)

Name	**Hersteller von HLG**	**Dienst-leister**	**Produkte/Verfahren**				
			Schneiden	Schweißen	Auftrag-schweißen	Reinigen/ Abtragen	Sonstiges
MV Laser	X	X	X	X	X		Heften/Traktoren
Jenoptik AG	X			X			+ Strahlquellen
Clean-Lasersysteme GmbH	X	X				X	
DSI Laser-Service GmbH		X		X	X		
Alpha Laser GmbH	X			X	X		Lasergeräte zum Feinschweißen
SLV Halle GmbH	X			X			Heften
Soliton Laser- und Messtechnik GmbH	X					X	+ Strahlquellen
Rofin-Sinar Laser GmbH	X			X			+ Strahlquellen, Lasergeräte zum Feinschweißen
Trumpf GmbH + Co. KG	X			X			+ Strahlquellen, Lasergeräte zum Feinschweißen
EL.EN. S.p.A.	X			X		X	Restaurierung
LOT-Oriel GmbH & Co. KG	X					X	
Limo Lissotschenko Mikrooptik GmbH	X			X			+ Strahlquellen
Compact Laser Solutions GmbH	X					X	+ Strahlquellen, Markieren
ProLas GmbH	X			X			Schweißen von Polymeren
Mobil-Mark GmbH						X	Markieren
Dr. Teschauer AG	X	X				X	Markieren
SLV Mecklenburg-Vorpommern GmbH	X			X			
Laserinstitut Mittelsachsen LASERVORM GmbH	X			X	X		
Laser Zentrum Hannover e.V.	X	X	X	X			Härten
TU Clausthal	X	X	X	X	X		
FHG-IWS, Dresden		X				X	Restaurierung
Dr. Busch Laser-werkzeuge GmbH	X	X	X	X	X		

Stand 04/2010: Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Anhang 2 Klassifikation der Gefährdungen bei HLG (allgemein)

Anh. 2, Tab. 1 Klassifikation der Gefährdungen bei HLG (allgemein)
(Tabellen auf den nächsten drei Seiten).

Klassifikation der Gefährdungen bei HLG

Klassifikation der Gefährdungen bei HLG		Bewertung mit Risikograph (PLr)				Bemerkungen
		Schadens-ausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung oder Begrenzung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko) (e=hohes Risiko)**	
1. Mechanische Gefährdung						
1.1 Ungeschützt bewegte Maschinenteile						
	Quetschstellen durch fehlende Abdeckung des Hilfsantriebs/der Vorschubkontrolle	1	2	1	**b**	
	Scherstellen durch fehlende Abdeckung des Hilfsantriebs/der Vorschubkontrolle	1	2	1	**b**	
	Einzugsstellen durch fehlende Abdeckung des Hilfsantriebs/der Vorschubkontrolle	1	2	1	**b**	
	Stoßstellen an mobiler Steuer-/Versorgungseinheit	1	2	1	**b**	
1.2 Teile mit gefährlichen Oberflächen						
	gefährliche Bruchkanten, wenn HLG nicht aus bruchsicherem Werkstoff	1	1	1	**a**	
	gefährliche Ecken, Kanten, wenn HLG nicht ergonomisch konstruiert	1	2	1	**b**	
	gefährliche Bruchkanten bei Bruch der Faser (optische Strahlführung)	1	1	1	**a**	
1.3 bewegte Transportmittel, bewegte Arbeitsmittel						
	Schwerpunkt des HLG nicht ergonomisch richtig ausgelegt (Kippen)	1	2	1	**b**	
	HLG nicht vor Absturz gesichert (Arbeiten auf hochgelegenen Arbeitsplätzen)	2	1	1	**c**	
1.4 unkontrolliert bewegte Teile						
	durch nicht ausreichend befestigte Bauteile am HLG	1	1	1	**a**	
	durch nicht fixierte Werkstücke oder Anlagenteile (Rückbau)	2	1	1	**c**	
	durch platzende, abreißende Schläuche der Gasversorgung	2	1	1	**c**	
	durch fehlende Mittel am HLG oder der Steuer-/Versorgungseinheit, die ein Wegrutschen/-rollen verhindern (bei Ablage)	1	1	1	**a**	
1.5 Sturz auf der Ebene, Ausrutschen, Stolpern, Umknicken, Fehltreten						
	in Abhängigkeit des Arbeitsplatzes und der Arbeitsumgebung, z.B. hochgelegener Arbeitsplatz	2	1	1	**c**	
2. Elektrische Gefährdung						
2.1 gefährlich Körperströme						
	Spannungsversorgung des HLG nicht als Schutzkleinspannung ausgelegt	2	2	1	**d**	ändern auf Schutzkleinspannung (safety extra low voltage: SELV)
	IP-Schutzart des HLG oder der Steuer-/Versorgungseinheit nicht angemessen	2	2	1	**d**	wenn nicht SELV
	fehlerhafte Schnittstellenauslegung der elektrischen Anschlüsse	2	2	1	**d**	wenn nicht SELV
	elektrische Anschlüsse werden nicht bestimmungsgemäß benutzt	2	1	1	**c**	wenn nicht SELV
	Schutz gegen direktes Berühren oder Fehlerschutz nicht gegeben	2	1	1	**c**	wenn nicht SELV
	durch fehlende regelmäßige Prüfung des Betriebsmittels	2	1	1	**c**	wenn nicht SELV
	bei Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Anlagen (z.B. Entlacken Strommasten)	2	2	1	**d**	wenn nicht freigeschaltet
3. Gefahrstoffe						
3.1 Gase						
Einatmen	Gefahr durch sauerstoffverdrängende Prozessgase (Helium, Argon, Stickstoff)	2	2	1	**d**	Arbeiten in engen Räumen mit entsprechendem Prozessgas
	Gefahr durch brandfördernde Prozessgase (Sauerstoff, Druckluft)	2	2	1	**d**	Arbeiten in engen Räumen mit entsprechendem Prozessgas
	Gefahr durch gesundheitsschädliche Gase, die als Emissionsprodukte während der Lasermaterialbearbeitung entstehen (Ozon, NOx, organische gasförmige Komponenten)	2	2	1	**d**	wenn keine Erfassungseinheit vorgesehen
3.2 Dämpfe						
	Gefahr durch einatembare Dämpfe bei der Lasermaterialbearbeitung (u.a. Metalldämpfe)	1	2	1	**b**	
3.3. Aerosole						
	Gefahr durch einatembare partikelförmige Gefahrstoffe bei der Lasermaterialbearbeitung (u.a. Schweißrauche, CrVI)	2	2	1	**4**	wenn keine Erfassungseinheit vorgesehen und Stoffe krebserzeugend
3.4 Flüssigkeiten						
	Gefahr durch Austritt von Hilfsstoffen (z.B. Kühlflüssigkeit für Optiken)	1	1	1	**a**	
	Gefahr durch Kontakt mit flüssigen Zusatzstoffen (z.B. Flussmittel beim Laserlöten)	1	1	1	**a**	
	Gefahr durch Nicht-Einhaltung der normalen Hygienebedingungen im Umgang mit HLG	1	1	1	**a**	
3.5 Feststoffe						
	Gefahr durch Kontakt mit pulver-/pasten- oder drahtförmigen Zusatzstoffen (Auftragschweißen)	(2)	2	1	**d**	wenn keine Erfassungseinheit vorgesehen und z.B. krebserzeugende Stoffe vorliegen
	Gefahr durch Kontakt mit gefährlichen oder kontaminierten Werkstücken (u.a. Asbest, radioaktives Material)	2	2	1	**d**	wenn keine Erfassungseinheit vorgesehen
	Gefahr durch Nicht-Einhaltung der normalen Hygienebedingungen im Umgang mit HLG	1	1	1	**a**	

Klassifikation der Gefährdungen bei HLG		Bewertung mit Risikograph (PLr)				Bemerkungen
		Schadens-ausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung oder Begrenzung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko) (e=hohes Risiko)**	
4. Biologische Gefährdung						
4.3 Allergene und toxische Stoffe von Mikroorganismen						
	Gefahr durch Einatmung oder Kontakt bei der Bearbeitung von kontaminierten Oberflächen oder Werkstoffen (Kunstrestaurierung, Reinigung)	2	2	1	**d**	
5. Brand- und Explosionsgefährdung						
5.1 Brandgefährdung durch Feststoffe, Flüssigkeiten, Gase						
	durch heiße Werkstoffteile (u.a. Schmelzspritzer) bei der Lasermaterialbearbeitung mit HLG	1	2	1	**b**	wenn keine Abschirmung vorhanden
	durch Metallbrände (bei Bearbeitung z.B. von Titan)	1	1	1	**a**	
	durch Austritt von brandfördernden Prozessgasen (u.a. Sauerstoff, Druckluft)	2	2	1	**d**	nur wenn fehlerhafte Prozessführung vorliegt
	durch den Laser verursachte Zündung von leicht entzündlichen Stoffe in der Arbeitsplatzumgebung (u.a. Papier, Holzwolle)	1	2	1	**b**	nur wenn Stoffe nicht entfernt wurden
5.2. explosionsfähige Atmosphäre						
	durch die Absorption der Laserstrahlung verursachte Zündung explosionsfähiger Atmosphären in der Arbeitsplatzumgebung (insbesondere bei Arbeit in engen Räumen)	2	2	1	**d**	nur wenn kritische/explosionsfähige Atmosphäre vorliegt
	durch Austritt von Prozessgasen (z.B. Sauerstoff) erzeugte explosionsfähige Atmosphäre in der Arbeitsplatzumgebung (insbesondere bei Arbeit in engen Räumen)	2	2	1	**d**	nur wenn bestimmte Voraussetzungen vorliegen
5.3 Explosivstoffe						
	durch die Absoption der Laserstrahlung verursachte Zündung eines Explosivstoffes in der Arbeitsplatzumgebung	2	2	1	**d**	nur wenn Explosivstoff vorliegt
5.4 elektrostatische Aufladung						
	Gefahr durch elektrostatische Aufladung von Bauteilen (z.B. der Abluftleitung) bei der Lasermaterialbearbeitung (vorwiegend bei Bearbeitung von Organika)	2	2	1	**d**	nur wenn keine Maßnahmen getroffen sind
6. Thermische Gefährdung						
6.1 Kontakt mit heißen Medien						
	durch direkten oder indirekten Kontakt mit Laserstrahl und thermischer Wechselwirkung	1	2	1	**b**	wenn keine Abschirmung vorhanden
	durch heiße Gase in der Prozesszone	1	2	1	**b**	wenn keine Abschirmung vorhanden
	durch heiße Bauteile des HLG, auf Grund Wärmestrahlung vom Prozess	1	2	1	**b**	wenn keine Abschirmung vorhanden
	durch heiße Bauteile des HLG, auf Grund fehlerhafter Strahlführung und Absorption von Laserstrahlung an Beuteilen mit nachfolgender Temperaturerhöhung	1	1	1	**a**	
	durch heiße Werkstoffteile (u.a. Schmelzspritzer) bei der Lasermaterialbearbeitung mit HLG	1	2	1	**b**	wenn keine Abschirmung vorhanden
	durch heiße Oberflächen von Werkstücken, die mit dem HLG bearbeitet werden	1	1	1	**a**	
7. Gefährdung durch spezielle physikalische Einwirkungen						
7.1 Lärm						
	Gefahr durch zu hohe Emissionsschalldruckpegel am Arbeitsplatz >70 dB(A) insbesondere bei Hochdruckschneiden und gepulstem Abtragen	2	2	1	**d**	wenn Düsen und/oder Abschirmung unzureichend gestaltet
	durch mangelhafte PSA gegen Lärm (Gehörschutz)	2	2	1	**d**	
7.4 Hand-/Arm-Schwingungen						
	Gefahr durch frei geführte, handgehaltene HLG (statisch: ohne Aufsatz auf das Werkstück)	1	2	1	**b**	
	Gefahr durch Übertragung von Schwingungen vom Werkstück oder dem Antriebssystem des HLG auf Hand oder Arm	1	2	1	**b**	
7.5 nichtionisierende Strahlung						
Laserstrahlung	Gefahr durch Exposition gegenüber Laserstrahlung (direkter Strahl, reflektierter Strahl, gestreuter Strahl)	2	2	1	**d**	
	Gefahr durch Exposition gegenüber Laserstrahlung bei fehlenden optischen Elementen, fehlerhaft justierten optischen Elementen oder Versagen von optischen Elementen (Umlenkspiegel, Linsen, Faser; u.a. Faserbruch)	2	1	1	**c**	
	Gefahr durch Exposition gegenüber Laserstrahlung bei fehlerhaft ausgelegten, fehlerhaft montierten oder versagenden Schnittstellen (Strahlaustritt an schnittstellen (u.a. Faserstecker)	2	1	1	**c**	
	Gefahr durch Exposition gegenüber Laserstrahlung bei Fehlfunktionen der Sicherheitssteuerung zur Freigabe/Isolierung der Laserstrahlung	2	1	1	**c**	
Sekundärstrahlung	Gefahr durch Exposition gegenüber beim Anwendungsprozess entstehender Sekundärstrahlung: UV-Strahlung beim Schweißen	1	1	1	**a**	
	Gefahr durch Exposition gegenüber beim Anwendungsprozess entstehender Sekundärstrahlung: Wärmestrahlung	1 (2)	1	1	**a (c)**	grauer Star/Katarakt; nur bei extremer Langzeitexposition >>10 Jahre

Klassifikation der Gefährdungen bei HLG		Bewertung mit Risikograph (PLr)				Bemerkungen
		Schadens-ausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung oder Begrenzung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko) (e=hohes Risiko)**	
8. Gefährdung durch Arbeitsumgebungsbedingungen						
8.1 Klima						
	Gefahr durch nicht angepasste klimatische Bedingungen zur Bedienung des HLG (zu dicke Handschuhe)	1	1	1	**a**	
	Gefahr durch nicht ausreichende Belüftung des Arbeitsplatzes (Sauerstoffmangel: siehe auch Gefahrstoffe)	1	1	1	**a**	
8.2 Beleuchtung						
	Gefahr durch mangelhafte Beleuchtungsstärke zur Bedienung des HLG	1	2	1	**b**	
	Gefahr durch Blendung (Sonnenstrahlung bei Arbeitsplätzen im Freien)	1	2	1	**b**	
8.3 Raumbedarf/Verkehrswege						
	Gefahr durch eingeschränkte Bewegungsfläche (Arbeiten in engen Räumen)	1	1	1	**a**	
9. Physische Belastung/Arbeitsschwere						
9.3 statische Arbeit						
	Gefahr durch mangelhafte Ergonomie des HLG und statische Haltungskonstanz (statisches Halten eines schweren, frei geführten handgehaltenen HLG)	2	2	1	**d**	nur bei langandauernder Tätigkeit
	Gefahr durch mangelhafte Ergonomie des HLG und statische Haltungskonstanz (Überkopfarbeiten von Aufsatz-HLG oder frei geführten handgehaltenen HLG)	2	2	1	**d**	nur bei langandauernder Tätigkeit
10. Wahrnehmung und Handhabbarkeit						
10.1 Informationsaufnahme						
	Gefahr durch Nicht-Wahrnehmung von optischen Signalen am HLG oder der Bedieneinheit (insb. bei Tragen von Laserschutzbrillen)	2	1	1	**c**	durch fehlerhaft ausgelöste Laserstrahlung
	Gefahr durch Nicht-Wahrnehmung von akustischen Signalen (insb. bei unzuträglichen Emissionsschalldruckpegeln)	2	1	1	**c**	durch fehlerhaft ausgelöste Laserstrahlung
10.2 Wahrnehmungsumfang						
	Gefahr durch Fehlinterpretationen u.a. durch zu große Anzahl von optischen Signalgebern am HLG	1	1	1	**a**	
10.3 erschwerte Handhabbarkeit von Arbeitsmitteln						
	Gefahr durch ungeeignete Bedienelemente am HLG und/oder der Steuer-/Versorgungs-einheit (mangelhafte Ergonomie, nicht mit PSA bedienbar)	1	1	1	**a**	
	Gefahr durch unsichere erschwerende Handhabung (fehlende Sicherung gegen unbeabsichtigtes in Gang setzen, fehlender Schutz gegen Abgleiten, Abrutschen)	1	1	1	**a**	
11. Sonstige Gefährdungen						
11.1 ungeeignete persönliche Schutzausrüstung (PSA)						
	Gefahr durch ungeeignete Laserschutzbrille	2	1	1	**c**	nur wenn Strahlung im Fehlerfall zugänglich wird
	Gefahr durch ungeeignete Kleidung (bietet keinen Mindestschutz gegenüber Laserstrahlung)	2	1	1	**c**	nur wenn Strahlung im Fehlerfall zugänglich wird
11.3 durch Menschen						
	Gefahr durch Unachtsamkeit im Umgang mit HLG und mangelnde Ausbildung (Eignung, Unterweisung, Lasersicherheit)	2	1	1	**c**	nur wenn Strahlung durch falsche Bedienung (fehlerhaft) zugänglich wird
	Gefahr durch mangelnde Koordination von Tätigkeiten mit HLG, u.a. bei Abgrenzungen/Abschirmungen von Laserbereichen	2	1	1	**c**	nur wenn Strahlung durch falsche Bedienung (fehlerhaft) zugänglich wird
12. Psychische Belastungen						
13. Organisation						
13.3. Qualifikation						
	Gefahr durch nicht angepasste Qualifikation des Bedieners und/oder ungünstiger Personalwahl	2	1	1	**c**	nur wenn Strahlung durch falsche Bedienung (fehlerhaft) zugänglich wird
13.4 Unterweisung						
	Gefahr durch ungenügende oder fehlende Unterweisung sowie Arbeitsanleitung (Fehlende Einweisung in das HLG, fehlende Einweisung in Arbeitsschutz und Lasersicherheit)	2	1	1	**c**	nur wenn Strahlung durch falsche Bedienung (fehlerhaft) zugänglich wird
13.6 Organisation, allgemein						
	Gefahr durch organisatorische Mängel: fehlende Gefährdungsbeurteilung, fehlende Betriebsanweisung, fehlende Prüfung des Arbeitsmittels, fehlende Koordination der Arbeiten (u.a. Abschirmen eines Laserbeichs)	2	1	1	**c**	nur wenn Strahlung durch falsche Bedienung (fehlerhaft) zugänglich wird

Anhang 3 Erforderliche Performance Level (PL_r)

Anh. 3, Tab. 1 Erforderliche Performance Level (PL_r) – Komponentenanalyse (Tabellen auf den nächsten vier Seiten).
Hier: Erläuterungen.

S1 für Haut: Verbrennung 2. Grades (ausheilbar)	F1 für stochastische Gefährdung über Arbeitszeit (zufälliger Fehler)	P1 für Haut: durch Rückziehreflex
S2 für Auge: bei irreversiblen Sehstörungen	F2 latente Gefahr bei ungeeigneter Auslegung	P2 für Auge: weil im Nicht-Sichtbaren keine Abwendungsreaktion erfolgt
Bauteil	der Ausfall des Bauteils selbst wurde in der Liste nicht explizit genannt	

Klassifikation der Gefährdungen bei HLG			Bewertung mit Risikograph (PL$_r$)				Bemerkung	Bewertung mit Risikograph (PL$_r$)				Bemerkung	Bewertung mit Risikograph (PL$_r$)				Bemerkung
Komponentenanlyse			Schadensausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung o. Begren-zung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko bis e= hohes Risiko)**		Schadensausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung o. Begren-zung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko bis e= hohes Risiko)**		Schadensausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung o. Begren-zung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko bis e= hohes Risiko)**	
7. Gefährdungen durch spezielle physikalische Einwirkungen 7.5 nichtionisierende Strahlung			**Szenario** HLG: pm<100 W Brennweite: f<200 mm					**Szenario** HLG: pm<100 W Brennweite: f<200 mm					**Szenario** HLG: pm<100 W Brennweite: f<200 mm				
Strahlführung			soweit nicht anders angegeben: für Haut und Auge gültig					soweit nicht anders angegeben: für Haut und Auge gültig					soweit nicht anders angegeben: für Haut und Auge gültig				
Bauteil			Haut/Auge		Haut/Auge	Haut/Auge		Haut/Auge		Haut/Auge	Haut/Auge		Haut/Auge		Haut/Auge	Haut/Auge	
Faserstecker: Lasergeräte-seitig	nicht gesteckter Stecker	Strahlaustritt	1/2	1	1/2	**a/d**	zufälliger Fehler	2/2	1	1/2	**c/d**	zufälliger Fehler	2/2	1	1/2	**c/d**	zufälliger Fehler
	inkompatibler Stecker																
	sich lösender Stecker																
	Erhitzung und Zerstörung bei beschädigten Faserendflächen																
Faser	Faserbruch																
	Erhitzung und Zerstörung bei beschädigten Faserendflächen																
Faserstecker: HLG-seitig	nicht gesteckter Stecker																
	inkompatibler Stecker																
	sich lösender Stecker																
	Erhitzung und Zerstörung bei beschädigten																
	Tordierung der Faser gegen HLG (Beschädigung, Lösen des Steckers)																
interne HLG-Umlenkoptiken fehlerhafte Strahlführung durch	fehlende Umlenkoptik	Bestrahlung der Gehäuseinnenwand (bei Versagen ggf. Strahlaustritt)	1/1	1	1	**a/a**	Erwärmung des Gehäuses ohne Strahlaustritt	1/1	1	1	**a/a**	Erwärmung des Gehäuses ohne Strahlaustritt	1/1	1	1	**a/a**	Erwärmung des Gehäuses ohne Strahlaustritt
	falsche Umlenkoptik																
	fehlerhaft positionierte Umlenkoptik																
	beschädigte Umlenkoptik	zu hohe Absorption (bei Versagen Bestrahlung der Gehäuseinnenwand und ggf. Strahlaustritt)															
interne HLG strahlformende Optiken (Fokussieroptik) fehlerhafte Strahlführung durch	fehlende Optik	Strahl wird nicht defokussiert / bleibt kollimiert (Laserbereich verändert/ Bestrahlungsstärke in Abstand a ggf. kritischer)	1/2	1	1	**a/c**	nur bei nicht angepasster Laserschutzbrille	1/2	1	1/2	**a/d**	nur bei nicht angepasster Laserschutzbrille	1/2	1	1/2	**a/d**	nur bei nicht angepasster Laserschutzbrille
	falsche Optik (Eigenschaft: u.a. Brennweite)	Laserbereich verändert / Bestrahlungsstärke in Abstand a ggf. kritischer															
	fehlerhaft positionierte Optik																
	beschädigte Optik	zu hohe Absorption (bei Versagen Bestrahlung der Gehäuseinnenwand und ggf. Strahlaustritt)	1/1			**a/a**	Erwärmung des Gehäuses ohne Strahlaustritt	1/1		1	**a/a**	Erwärmung des Gehäuses ohne Strahlaustritt	1/1		1	**a/a**	Erwärmung des Gehäuses ohne Strahlaustritt
Strahlführungskontrollen																	
Streulichtsensor innerhalb HLG	Streulichtsensor falsch positioniert (z.B. Abschattung)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission, ggf. Strahlaustritt aus HLG-Gehäuse	1/1	1	1	**a/a**	Erwärmung des Gehäuses ohne Strahlaustritt	1/1	1	1/1 1	**a/a**	Erwärmung des Gehäuses ohne Strahlaustritt	1/1	1	1	**a/a**	Erwärmung des Gehäuses ohne Strahlaustritt
	Empfangswinkel des Sensors zu klein / zu wenig Sensoren (Signal ist nicht repräsentativ)																
	Fehlerhafte Auswahl hinsichtlich spektralen Messbereichs des Sensors		1/2			**a/c**	mit Strahlaustritt	1/2		1/2	**a/d**	mit Strahlaustritt	2/2		1/2	**c/d**	mit Strahlaustritt
	Sensor verdreckt (schlechtes Signal Rausch-Verhältnis)	Prozessstörung oder fehlerhafte Strahlfreigabe (je nach Signalauswertung)															
	Sensor übersteuert (z.B. Strahlung, die in das Gehäuse vom Prozess eindringt)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission, ggf. Strahlaustritt aus HLG-Gehäuse															
	fehlerhafte Definition der Alarmschwelle																
	fehlerhafte Signalverarbeitung des Sensors (Steuerung)																
Temperatursensor innerhalb HLG (Kontakt mit Bauteilen, z.B. Pt100)	Temperatursensor falsch positioniert (z.B. Abschat-tung / eingeschränkte Wärmeleitung zum Sensor)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission, ggf. Strahlaustritt aus HLG-Gehäuse	1/1	1	1	**a/a**	Erwärmung des Gehäuses ohne Strahlaustritt	1/1	1	1	**a/a**	Erwärmung des Gehäuses ohne Strahlaustritt	2/2	1	1/2	**c/d**	mit Strahlaustritt
	Empfindlichkeit des Sensors nicht angepasst / zu wenig Sensoren (Signal ist nicht repräsentativ)																
	Queremfindlichkeit des Sensors zu Umgebungstemperaturen																
	fehlerhafte Definition der Alarmschwelle																
	fehlerhafte Signalverarbeitung des Sensors (Steuerung)																
Monitordiode (Ausblendung eines Strahlanteils zur Energie-/Leistungsmessung i.V. zum Lasergerät)	Monitordiode falsch positioniert (z.B. Abschattung)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission, ggf. Strahlaustritt aus HLG-Gehäuse	1/2	1	1	**a/c**	mit Strahlaustritt	2/2	1	1/2	**c/d**	mit Strahlaustritt	2/2	1	1/2	**c/d**	mit Strahlaustritt
	Fehlerhafte Auswahl hinsichtlich spektralen Messbereichs des Sensors	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission															
	Umlenkspiegel (Pinhole) dejustiert und oder verdreckt	Prozessstörung oder fehlerhafte Strahlfreigabe/ -emission, Strahlaustritt aus HLG-Gehäuse															
	Queremfindlichkeit des Sensors Streustrahlung	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission, Strahlaustritt aus HLG-Gehäuse															
	fehlerhafte Definition der Alarmschwelle (normale Strahlverluste)																
	fehlerhafte Signalverarb. des Sensors (Steuerung)																

Klassifikation der Gefährdungen bei HLG

Komponentenanlyse			Bewertung mit Risikograph (PLr)				Bemerkung	Bewertung mit Risikograph (PLr)				Bemerkung	Bewertung mit Risikograph (PLr)				Bemerkung
			Schadensausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung o. Begrenzung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko bis e= hohes Risiko)**		Schadensausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung o. Begrenzung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko bis e= hohes Risiko)**		Schadensausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung o. Begrenzung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko bis e= hohes Risiko)**	
7. Gefährdungen durch spezielle physikalische Einwirkungen 7.5 nichtionisierende Strahlung			**Szenario** HLG: pm<100 W Brennweite: f<200 mm					**Szenario** HLG: pm<100 W Brennweite: f<200 mm					**Szenario** HLG: pm<100 W Brennweite: f<200 mm				
Aufsatzkontrolle / Abstandkontrolle																	
berührend: Bauteile																	
Nadel mit codiertem Stromfluss (eine Nadel) (Werkstück muss elektrisch leitend sein)	Abstand Nadelspitze/Brennfleck zu groß	Strahldurchtritt durch Werstückspalten Strahlpropagation an Werkstückkante vorbei	1/2	1	1	**a/c**		1/2	1	1/2	**a/d**	Bestrahlung der Hose	1/2	1	1/2	**a/d**	Bestrahlung der Hose
	großer Verkippungsbereich	großer Winkelbereich reflektierter Laserstrahlung		2		**b/d**			2	2	**b/e**			2	2	**b/e**	
	Hakende Nadel/Stromfluss häufig unterbrochen	Prozessstörung -> Drang zur Überbrückung (Missbrauch)	1/1	1	1/1	**a/a**		1/1	1	1/1	**a/a**		1/1	1	1/1	**a/a**	
	Nadellänge und Brennweite nicht angepasst	ausgedehnte Quelle reflektierter Laserstrahlung	1/2	2	1	**b/d**		1/2	2	1/2	**b/e**		1/2	2	1/2	**b/e**	
	Nadel manipuliert (kurzgeschlossen: direkter Stromfluß) fehlerhafte Signalverarbeitung (Steuerung)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission		1		**a/c**		2/2	1		**c/d**		2/2	1		**c/d**	
federbelasteter Schleifer mit bewegtem Stift (ein Schleifer)	Stift(e) hängt fest in oberer Position (HLG-liegt auf = Strahlfreigabe) Stift in oberer Position festgestellt (Manipulation)	fehlerhafte Strahlfreigabe	1/2	1	1	**a/c**		2/2	1	1/2	**c/d**		2/2	1	1/2	**c/d**	
	Stift(e) schwergängig, haken oder verbleiben in unterer Position	Prozessstörung -> Drang zur Überbrückung (Missbrauch)	1/1		1/1	**a/a**		1/1		1/1	**a/a**		1/1		1/1	**a/a**	
	Abstände der Stifte zu groß	Strahldurchtritt durch Werstückspalten Strahlpropagation an Werkstückkante vorbei	1/2		1	**a/c**		1/2		1/2	**a/d**	Bestrahlung der Hose	1/2		1/2	**a/d**	Bestrahlung der Hose
	großer Verkippungsbereich bei nur einem Stift eindimensionaler Verkippungsbereich bei 2 Stiften	großer Winkelbereich reflektierter Laserstrahlung		2		**b/d**			2		**b/e**			2		**b/e**	
	fehlerhafte Signalverarbeitung der Wegaufnehmer (mech. Schalter, induktiver oder kapazitiver Sensor, Steuerung)	Prozessstörung oder fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission		1		**a/c**		2/2	1		**c/d**		2/2	1		**c/d**	
federbelastete Andruckrolle(n)	Andruckrolle hängt fest in oberer Position (HLG-liegt auf = Strahlfreigabe) Andruckrolle in oberer Position festgestellt (Manipulation)	fehlerhafte Strahlfreigabe	1/2	1	1	**a/c**		2/2	1	1/2	**c/d**		2/2	1	1/2	**c/d**	
	Andruckrolle schwergängig, hakt oder verbleibt in unterer Position	Prozessstörung -> Drang zur Überbrückung (Missbrauch)	1/1		1/1	**a/a**		1/1		1/1	**a/a**		1/1		1/1	**a/a**	
	zu großer Abstand zwischen Strahlposition und Rollenmittelpunkt	Strahldurchtritt durch Werkstückspalten Strahlpropagation an Werkstückkante vorbei	1/2		1	**a/c**		1/2		1/2	**a/d**		1/2		1/2	**a/d**	
	großer Verkippungsbereich bei schmaler Rolle (1)	großer Winkelbereich reflektierter Laserstrahlung		2		**b/d**			2		**b/e**			2		**b/e**	
	fehlerhafte Signalverarbeitung der Wegaufnehmer (Steuerung)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission		1		**a/c**		2/2	1		**c/d**		2/2	1		**c/d**	
berührungslos: Bauteil (elektrisch)																	
induktiver Sensor (benötigt metall. Werkstück)	Störfelder	Prozessstörung oder fehlerhafte Strahlfreigabe	1/2	1	1	**a/c**		2/2	1	1/2	**c/d**		2/2	1	1/2	**c/d**	
	Abstände der Sensoren zu groß	Strahldurchtritt durch Werstückspalten Strahlpropagation an Werkstückkante vorbei						1/2			**a/d**	Bestrahlung der Hose	1/2			**a/d**	Bestrahlung der Hose
	großer Verkippungsbereich bei nur einem Sensor eindimensionaler Verkippungsbereich bei 2 Sensoren	großer Winkelbereich reflektierter Laserstrahlung		2		**b/d**			2		**b/e**			2		**b/e**	
	fehlerhafte Definition der Alarmschwelle (kritische Distanz) fehlerhafte Signalverarbeitung (Steuerung)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission, Strahlaustritt aus HLG-Gehäuse fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission		1		**a/c**		2/2	1		**c/d**		2/2	1		**c/d**	
kapazitiver Sensor (für alle Werkstoffe geeignet)	Störfelder Epfindlichkeit in Abhängigkeit des Werkstückmaterials (Signalanpassung erforderlich)	Prozessstörung oder fehlerhafte Strahlfreigabe	1/2	1	1	**a/c**		2/2	1	1/2	**c/d**		2/2	1	1/2	**c/d**	
	Abstände der Sensoren zu groß	Strahldurchtritt durch Werstückspalten Strahlpropagation an Werkstückkante vorbei						1/2			**a/d**	Bestrahlung der Hose	1/2			**a/d**	Bestrahlung der Hose
	großer Verkippungsbereich bei nur einem Sensor eindimensionaler Verkippungsbereich bei 2 Sensoren	großer Winkelbereich reflektierter Laserstrahlung		2		**b/d**			2		**b/e**			2		**b/e**	
	fehlerhafte Definition der Alarmschwelle (kritische Distanz) fehlerhafte Signalverarbeitung (Steuerung)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission, Strahlaustritt aus HLG-Gehäuse fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission		1		**a/c**		2/2	1		**c/d**		2/2	1		**c/d**	

Klassifikation der Gefährdungen bei HLG Komponentenanlyse			Bewertung mit Risikograph (PL$_r$)				Bemerkung	Bewertung mit Risikograph (PL$_r$)				Bemerkung	Bewertung mit Risikograph (PL$_r$)				Bemerkung
			Schadensausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung o. Begrenzung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko bis e= hohes Risiko)**		Schadensausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung o. Begrenzung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko bis e= hohes Risiko)**		Schadensausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung o. Begrenzung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko bis e= hohes Risiko)**	
7. Gefährdungen durch spezielle physikalische Einwirkungen 7.5 nichtionisierende Strahlung			**Szenario** HLG: pm<100 W Brennweite: f<200 mm					**Szenario** HLG: pm<100 W Brennweite: f<200 mm					**Szenario** HLG: pm<100 W Brennweite: f<200 mm				
berührungslos: Bauteil (optisch)																	
Abstandssensor (Distanzsensor, Triangulation)	kein verwertbares Signal durch Übersteuerung des Sensors (Laserlicht, Prozessleuchten, Wärmestrahlung)	Prozessstörung -> Drang zur Überbrückung (Missbrauch)	1/1	1	1	**a/a**		1/2	1	1/2	**a/d**		1/2	1	1/2	**a/d**	ohne Strahlaustritt
	kein verwertbares Signal durch fehlende Reflexion am Werkstück																
	Emitter oder Sensor verdreckt (schlechtes Signal Rausch-Verhältnis)	Prozessstörung oder fehlerhafte Strahlfreigabe (je nach Signalauswertung)	1/2			**a/c**	bei fehlerhafter Strahlfreigabe										bei fehlerhafter Strahlfreigabe
	zu großer Abstand zwischen Messpunkt und Bearbeitungsbereich	Strahldurchtritt durch Werstückspalten Strahlpropagation an Werkstückkante vorbei										Bestrahlung der Hose					Bestrahlung der Hose
	großer Verkippungsbereich bei einem Messpunkt auf Werkstück	großer Winkelbereich reflektierter Laserstrahlung		2		**b/d**			2		**b/e**			2		**b/e**	
	fehlerhafte Signalverarbeitung der optischen Sensoren (Steuerung)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission		1		**a/c**		2/2	1		**c/d**			1		**a/d**	
Fremdlicht-Umgebungssensor im Laserbereich	Werkstück für Laserstrahlung transparent aber nicht für Fremdlicht	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission bei Werkstückauflage	1/2	1	1	**a/c**		2/2	1	1/2	**c/d**		1/2	1	1/2	**a/d**	
	Fehlerhafte Auswahl hinsichtlich spektralen Messbereichs des Sensors	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission		2		**b/d**	bei Auflagegerät/ keine Schutzbrille		2		**d/e**	bei Auflagegerät/ keine Schutzbrille	2/2	2		**d/e**	bei Auflagegerät/ keine Schutzbrille
	Überstrahlung durch Prozessleuchten (ungeeignetes optisches Filter)	Prozessstörung oder fehlerhafte Strahlfreigabe (je nach Signalauswertung)															
	Sensor verdreckt (schlechtes Signal Rausch-Verhältnis)																
	Empfangswinkel des Sensors zu klein: zu großer Abstand vom Sensor zum Spalt / zu wenig Sensoren	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission															
	fehlerhafte Definition der Alarmschwelle																
	fehlerhafte Signalverarbeitung der optischen Sensoren (Steuerung)			1		**a/c**			1		**c/d**			1		**c/d**	
Streulichtsensor außerhalb der Prozessabschirmung	Streulichtsensor falsch positioniert (z.B. Abschattung)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission	1/2	2	1	**b/d**	bei Auflagegerät/ keine Schutzbrille	2/2	2	1/2	**d/e**	bei Auflagegerät/ keine Schutzbrille	2/2	2	1/2	**d/e**	bei Auflagegerät/ keine Schutzbrille
	Empfangswinkel des Sensors zu klein (Signal ist nicht repräsentativ)																
	Fehlerhafte Auswahl hinsichtlich spektralen Messbereichs des Sensors																
	Sensor verdreckt (schlechtes Signal Rausch-Verhältnis)	Prozessstörung oder fehlerhafte Strahlfreigabe (je nach Signalauswertung)															
	fehlerhafte Definition der Alarmschwelle	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission															
	fehlerhafte Signalverarbeitung des Sensors (Steuerung)																
IR Emitter/Sensor (Teststrahl wird reflektiert und ausgewertet, z.B. für Erkennung von Haut vor Strahlöffnung)	Überstrahlung durch Prozessleuchten (ungeeignetes optisches Filter)	Prozessstörung oder fehlerhafte Strahlfreigabe (je nach Signalauswertung)	1/2	1	1	**a/c**	bei fehlerhafter Strahlfreigabe	2/2	1	1/2	**c/d**		2/2	1	1/2	**c/d**	bei fehlerhafter Strahlfreigabe
	Empfangswinkel des Sensors zu klein (Signal ist nicht repräsentativ)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission															
	Fehlerhafte Auswahl hinsichtlich spektralen Messbereichs des Sensors																
	Sensor verdreckt (schlechtes Signal Rausch-Verhältnis)	Prozessstörung oder fehlerhafte Strahlfreigabe (je nach Signalauswertung)					bei fehlerhafter Strahlfreigabe										bei fehlerhafter Strahlfreigabe
	fehlerhafte Definition der Alarmschwelle																
	fehlerhafte Auswertealgorithmen bei Systemen mit Spektralanalyse																
	fehlerhafte Signalverarbeitung des Sensors (Steuerung)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission															
berührungslos: Bauteil (Druckmessung)																	
Düse/Prallplatte (Druckmessung)	Abstand Werkstück/HLG Einhausung nicht korrekt (fehlerhaftes Drucksignal)	Prozessstörung -> Drang zur Überbrückung (Missbrauch)	1/1	1	1	**a/a**		1/2	1	1/2	**a/d**		1/2	1	1/2	**a/d**	
	zusätzliches Prallblech montiert	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission	1/2	2		**b/d**	bei Auflagegerät/ keine Schutzbrille		2		**b/e**	bei Auflagegerät/ keine Schutzbrille		2		**b/e**	bei Auflagegerät/ keine Schutzbrille
vollständige Einhausung (Druckmessung im Laserbereich)	zu wenig Messpunkte über Einhausung	Spalte möglich / Strahlungsemission															
	Alarmbereich (Druck) nicht korrekt definiert																
	fehlerhafte Signalverarbeitung des Drucksensors(en) (Steuerung)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission															

Klassifikation der Gefährdungen bei HLG			Bewertung mit Risikograph (PLr)				Bemerkung	Bewertung mit Risikograph (PLr)				Bemerkung	Bewertung mit Risikograph (PLr)				Bemerkung
Komponentenanlyse			Schadensausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung o. Begren-zung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko bis e= hohes Risiko)**		Schadensausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung o. Begren-zung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko bis e= hohes Risiko)**		Schadensausmaß [S]	Häufigkeit und Dauer der Exposition [F]	Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung o. Begren-zung des Schadens [P]	**Risiko (a=kleines Risiko bis e= hohes Risiko)**	
7. Gefährdungen durch spezielle physikalische Einwirkungen 7.5 nichtionisierende Strahlung			**Szenario** HLG: pm<100 W Brennweite: f<200 mm					**Szenario** HLG: pm<100 W Brennweite: f<200 mm					**Szenario** HLG: pm<100 W Brennweite: f<200 mm				
Näherungsmelder/-sensor																	
IR-Melder /-sensor in Arbeitsbereich (hier Laserbereich) erkennt Personen, die in Strahlbereich treten	Überstrahlung durch Prozessleuchten (ungeeignetes optisches Filter)	Prozessstörung oder fehlerhafte Strahlfreigabe (je nach Signalauswertung)					bei fehlerhafter Strahlfreigabe										bei fehlerhafter Strahlfreigabe
	Empfangswinkel des Sensors zu klein (Signal ist nicht repräsentativ)	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission															
	Sensor verdreckt (schlechtes Signal Rausch-Verhältnis)	Prozessstörung oder fehlerhafte Strahlfreigabe (je nach Signalauswertung)	1/2	1	1	**a/c**	bei fehlerhafter Strahlfreigabe	2/2	1	1/2	**c/d**		2/2	1	1/2	**c/d**	bei fehlerhafter Strahlfreigabe
	Empfangswinkel des Sensors zu klein: zu großer Abstand vom Sensor zum Spalt / zu wenig Sensoren	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission															
	fehlerhafte Definition der Alarmschwelle																
	fehlerhafte Signalverarbeitung des optischen Sensors (Steuerung)																
Laserscanner (Abstandsmessung zu Personen im Arbeitsbereich) erkennt Personen, die in Strahlbereich treten	fehlerhafte Definition der Alarmschwelle	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission	1/2	1	1	**a/c**	wenn Person ohne Augenschutz	2/2	1	1/2	**c/d**	wenn Person ohne Augenschutz	2/2	1	1/2	**c/d**	wenn Person ohne Augenschutz
	fehlerhafte Einbindung und/oder Signalverarbeitung (Steuerung)																
Bedienungselemente (Schalter/Taster)																	
Fußschalter/-taster	Einrasten des Schalters (in Abhängigkeit mit weiteren Interlocks, z.B. Aufsatzkontrolle), Verhaken des Tasters	ungewollte Strahlfreigabe / Strahlemission (Exposition insbesondere der Hände des Bedieners)	1/2	1	1	**a/c**		2/2	1	1/2	**c/d**		2/2	1	1/2	**c/d**	
	Ungewollte Betätigung	ungewollte Strahlfreigabe / Strahlemission															
	ohne logische Veknüpfung mit anderen Interlocks leichte Manipulierbarkeit																
Einfingerschaltung (Schalter)	Einrasten des Schalters (in Abhängigkeit mit weiteren Interlocks, z.B. Aufsatzkontrolle)	ungewollte Strahlfreigabe / Strahlemission (Exposition insb. der 2. Hand des Bedieners)	1/2	1	1	**a/c**		2/2	1	1/2	**c/d**		2/2	1	1/2	**c/d**	
	Ungewollte Betätigung	ungewollte Strahlfreigabe / Strahlemission															
	ohne logische Veknüpfung mit anderen Interlocks leichte Manipulierbarkeit																
Einfingerschaltung (Taster)	Verhaken des Tasters	ungewollte Strahlfreigabe / Strahlemission (Exposition insb. der 2. Hand des Bedieners)	1/2	1	1	**a/c**		2/2	1	1/2	**c/d**		2/2	1	1/2	**c/d**	
	Ungewollte Betätigung	ungewollte Strahlfreigabe / Strahlemission															
	ohne logische Veknüpfung mit anderen Interlocks leichte Manipulierbarkeit																
Zweifingerschaltung	ohne logische Veknüpfung der Tastreihenfolge leichte Manipulierbarkeit	ungewollte Strahlfreigabe / Strahlemission	1/2	1	1	**a/c**		2/2	1	1/2	**c/d**		2/2	1	1/2	**c/d**	
Zweihandsicherheitssteuerung	bei falscher Verknüpfung mit Steuerung	ungewollte Strahlfreigabe / Strahlemission	1/2	1	1	**a/c**		2/2	1	1/2	**c/d**		2/2	1	1/2	**c/d**	
Elektrische/elektronische/programmierbare Steuerung																	
Strahlisolierung	fehlerhaftes Design der Steuerung	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission	1/2	2	1	**b/d**		2/2	2	1/2	**d/e**		2/2	2	1/2	**d/e**	
	fehlende Einbindung von Interlocks																
	fehlerhafte Auswertung von Signalen																
	unzureichende Fehlertoleranz																
Not-Aus	fehlerhaftes Design der Steuerung	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission	1/2	2	1	**b/d**		2/2	2	1/2	**d/e**		2/2	2	1/2	**d/e**	
Wiederanlauf nach Not-AUS	fehlerhaftes Design der Steuerung	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission	1/2	2	1	**b/d**		2/2	2	1/2	**d/e**		2/2	2	1/2	**d/e**	
Betriebsartenwahl	fehlerhaftes Design der Steuerung	fehlerhafte Strahlfreigabe/-emission	1/2	2	1	**b/d**		2/2	2	1/2	**d/e**		2/2	2	1/2	**d/e**	

Anhang 4 Risikographen

DIN EN ISO 12100-1

S schwere der Verletzung
S1 leichte (üblicherweise reversible Verletzung)
S2 ernste (üblicherweise irreversible Verletzung einschließlich Tod)

F Häufigkeit und/oder Dauer der Gefährdungsexposition
F1 selten bis weniger häufig und/oder die Zeit der Gefährdungsexposition ist kurz
F2 häufig bis dauernd und/oder die Zeit der Gefährdungsexposition ist lang

P Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung oder Begrenzung des Schadens
P1 möglich unter bestimmten Bedingungen
P2 kaum möglich

R Risiko
R1 großes Risiko (Maßnahmen mit erhöhter Schutzwirkung dringend erforderlich)
R2 erhöhtes Risiko
R3 mittleres Risiko (Maßnahmen mit normaler Schutzwirkung notwendig)
R4 leichtes Risiko
R5 kleines Risiko (Maßnahmen organisatorisch und personenbezogen möglich)

DIN EN ISO 11553-1

S Schadensumfang
S1 Geringfügige Verletzung (geringe Folgen)
S2 Vollständig heilbare Verletzung (z. B. geringe Verbrennung)
S3 Dauernde, geringe Gesundheitsschädigung (geringe Netzhautschädigung, Verbrennungen)
S4 Dauerhafte, ernste Gesundheitsschädigung (z. B. Verlust des Sehvermögens auf mindestens einem Auge, schwere Verbrennung mit Narbenbildung)
S5 Tod

F Häufigkeit und/oder Dauer der Gefährdungsexposition
F1 0,25 s
F2 10 s
F3 100 s
F4 30.000 s

P Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Gefährdung
P1 schwer vorstellbar
P2 vorstellbar, aber ungewöhnlich
P3 unter bestimmten Umständen möglich
P4 kann erwartet werden
P5 definitiv auftretend

Anhang 5 Vorschläge für Prüfverfahren

Prüfverfahren zur Überprüfung der funktionalen Sicherheit von HLG

Die Beschreibung oder der Verweis auf mögliche Prüfverfahren der funktionalen Sicherheit von handgeführten Lasern könnte als integraler Bestandteil des Abschnittes 6 „Überprüfung der Sicherheitsanforderungen und -maßnahmen" der Fachnorm (Typ C-Norm) DIN EN ISO 11553-2 „Sicherheit von Maschinen – Laserbearbeitungsmaschinen – Teil 2: Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte" erfolgen.
Die in der bestehenden Norm ausgeführten Unterpunkte (6.1 „Allgemeine Einhaltung", 6.2 „Einteilung in Steuerungskategorien" und 6.3 „Einteilung in Laserklassen") beinhalten zwar schon grundlegende Aspekte, Ziel sollte es aber sein, einem Leser/Nutzer der Norm genauere und praxisrelevantere Informationen (z. B. in einem informativen Anhang) bereitzustellen.
Im Folgenden sind Vorschläge für diesbezügliche Informationen beschrieben.
Da für die Überprüfung/Validierung der Sicherheitsanforderungen (durch Prüfverfahren) konkrete Anforderungen dokumentiert sein müssen, wird auch auf die Ermittlung dieser Kenngrößen im Folgenden kurz eingegangen.

1) Konkrete Daten über das Risiko durch Laserstrahlung (über die Laserklassen-Einteilung hinausgehend)

Hier sei explizit auf die Abschätzung/Berechnung der vorhersehbaren Maximalbestrahlung **(*VMB*)** in möglichen Abständen zur HLG-Strahlaustrittsebene hingewiesen, in welchen es zu unbeabsichtigten Expositionen von Körperteilen des Bedieners oder dritter Personen kommen kann. Dieses bedingt die genaue Kenntnis der Strahlparameter durch Berechnung oder Messung.
Durch Vergleiche mit den Grenzwerten der maximal zulässigen Bestrahlung – MZB (unter der Voraussetzung des Tragens von Laserschutzbrillen ist insbesondere die ungeschützte Haut zu betrachten) – ist bei bekannter VMB die maximal erlaubte Expositionszeit **(t_{exp})** zu ermitteln.
Neben dem bestimmungsgemäßen Betrieb sind insbesondere vorsehbare Fehlerbedingungen wie Abheben, Abrutschen, Verkippen oder Bewegen des HLG über eine Werkstückkante und Bestrahlungen durch den direkten oder reflektierten Laserstrahl in die Betrachtung mit einzubeziehen.

2) Beitrag der Schutzeinrichtungen zur Risikominderung

Für jede Schutzeinrichtung muss die Sicherheitsfunktion identifiziert und müssen die Anforderungen definiert werden. Dieses betrifft sowohl Schutzeinrichtungen ohne sicherheitsrelevante Steuereinrichtungen (z. B. Abschirmungen gegen Laserstrahlung) als auch sicherheitsrelevante Steuereinrichtungen (Sicherheitssteuerung zur Isolation/Deaktivierung der Laserstrahlung).

- Für Abschirmungen gegen Laserstrahlung sind die Anforderungen und die Validierung (Prüfung) in der Norm DIN EN 60825-4 erläutert.
- Für sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen sind die Verfahren der DIN EN ISO 13849-1 anzuwenden.

Allgemein gilt: Je höher der Beitrag zur Risikominderung einer Sicherheitsfunktion ist, desto höher sind die Anforderungen an ihre Zuverlässigkeit.
(Beispiel: Ein sicherer handgeführter Laser (gekapselter Laser der Klasse 4) zum Beschriften darf keine schädigende Bestrahlung oberhalb der $MZB_{Auge/Haut}$ verursachen. Die Bediener und andere Personen tragen keine PSA. Der Beitrag zur Risikominderung der Abschirmung und der sicherheitsrelevanten Steuereinrichtungen zur Aufsatzkontrolle (Gewährleistung einer vollständigen Abschirmung der Bearbeitungszone) sind hoch. Dieses bedingt hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Abschirmung und der sicherheitsrelevanten Steuerungseinrichtungen.

3) Validierung der Schutzeinrichtungen

3.1 Theoretische Validierung

Sofern sicherheitsrelevante Steuereinrichtungen zur Risikominderung beitragen, erfolgt die Validierung ihrer Zuverlässigkeit gemäß der DIN EN ISO 13849-1.
Anhand der realisierten Architektur der Steuerung einschließlich der sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung wird der Performance Level (PL) für jede Sicherheitsfunktion bestimmt. Dieser PL wird mit dem erforderlichen Performance Level (PL_r) für die entsprechende Sicherheitsfunktion verglichen. Dabei muss die Anforderung $PL \geq PL_r$ erfüllt werden.
Entscheidend ist, dass hier auch die Komponenten des Lasergerätes, die als sicherheitsbezogene Teile der Steuerung dienen (z. B. Strahlverschluss, Relais für Versorgungsspannung), mit einbezogen werden.

Sicherheitsfunktionen können u. a. sein:

- Sicherheitsbezogene Stopp-Funktion durch Schutzeinrichtung (hier z. B. Laser-Stopp durch Auslösen der Auflagekontrolle)
- Start-/Wiederanlauffunktion
- Zustimmfunktion für Laserstart (hier z. B. Zweihandschaltung)
- Vermeidung des unerwarteten Anlaufs (hier Freigabe der Laserstrahlung)
- Steuerungsfunktionen und Betriebsartenwahl
- Funktion zum manuellen Stillsetzen im Notfall
- Funktion zur Beherrschung von Schwankungen, Verlust und Wiederkehr der Energiequellen (z. B. Unterspannungsschutz)

Hilfestellung bei der Berechnung bzw. Validierung bieten am Markt verfügbare Softwareprogramme (u. a. SISTEMA), die eine automatisierte Berechnung der Zuverlässigkeitswerte (wie PL) erlauben.

3.2) Praktische Validierung

Die praktische Validierung der sicherheitsrelevanten Steuereinrichtungen erfolgt an Funktionsträgern, typischerweise an speziellen Prüfanordnungen und/oder bei der realen Laserbearbeitung der vorgesehenen Werkstücke und Werkstoffe.

a) *Validierung der Systemreaktionszeit/Nachlaufzeit*
Zu Verifizieren ist die Systemreaktionszeit/Nachlaufzeit, d. h. die Zeit bis zur sicheren Laserstrahlisolierung oder -deaktivierung.
Diesbezüglich ist eine Prüfanordnung zu erstellen, mit der eine Schutzeinrichtung zeitlich definiert ausgelöst werden kann (Triggersignal). Die Systemreaktionszeit wird durch Abgreifen des Signals am letzten Glied der Steuerung (Aktuator) gemessen.

Dieses kann auch eine Monitordiode im Laser-Strahlengang sein, wenn die entsprechende Ansprechzeit der Diode bekannt ist. Die Signale können auf einer entsprechenden Anzeigeeinrichtung (z. B. Oszilloskop) dargestellt werden.

Bewertung:

- Die Systemreaktionszeit muss kleiner sein als die maximal zulässige Expositionszeit, ggf. zuzüglich einer Zeitdauer (Greifzeit), die benötigt wird, um mit bestimmten Körperteilen in den Bereich der Laserstrahlung zu gelangen.
  $t_{sys} \leq t_{exp} + t_{greif}$.

b) *Allgemeine Validierung, alle Sensoren betreffend*

Zu verifizieren ist die stabile Montage der Sensoren (keine Positionsänderungen) unter Berücksichtigung der angegebenen Schaltabstände. Die Aufnahmen wie auch die Sensoren selbst müssen mechanisch stabil sein (sich nicht biegen).

Bewertung:

- In Abhängigkeit von der Anzahl der Sensoren auf einer Achse ist insbesondere das Verkippen um diese Achse zu bewerten. (Beispiel: Bei Verwendung einer stromdurchflossenen Kontaktnadel als Auflagekontrolle kann das HLG auch bei aufliegender Nadel um mehrere Achsen verkippt werden, wodurch Laserstrahlung als direkter Strahl oder gerichtet reflektierter Strahl in verschiedene Raumrichtungen – ggf. an einer möglichen HLG-Abschirmung vorbei – propagieren und gefährliche Expositionen bewirken kann).

c) *Validierung bei Auflagesensoren*

Zu Verifizieren sind die relative Position bzw. der relative Abstand der Sensoren zur Achse des Laserstrahls und die damit verbundene örtlich sowie zeitlich differierende Auslösung eines Schaltsignals der Sensoren. Eine entsprechende Prüfanordnung ist zu erstellen.

Bewertung:

- Beurteilt werden muss, ob beim Bewegen der Laserstrahlaustrittsöffnung/des Bearbeitungsflecks über eine Werkstückkante oder über Werkstückaussparungen keine direkte oder direkt reflektierte Laserstrahlung an HLG-Abschirmungsteilen oder Werkstückarealen vorbei in den Raum propagiert und hierdurch kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. auch mit Punkt a).

d) *Validierung bei stromdurchflossener Kontaktnadel (berührend)*

Zu verifizieren ist die Auslösung eines Schaltsignals bei einer entsprechenden Hubhöhe der Nadel (ggf. Schalt-Lichtbogen) bzw. korrespondierend einer Hubhöhe des HLG (Abheben und/oder Verkippen). Eine entsprechende Prüfanordnung ist zu erstellen.

Bewertung:

- Beurteilt werden muss, ob durch das Verkippen oder Abheben des HLG bei der entsprechenden Hubhöhe des HLG direkte oder direkt reflektierte Laserstrahlung an HLG-Abschirmungsteilen in den Raum propagiert und hierdurch kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. auch mit dem Punkt zur Systemreaktionszeit). Dieses kann durch Kalkulationen oder Messungen (im Hinblick auf die propagierende Laserstrahlung) erfolgen.
- Bei den Prüfungen müssen auch kritische Umgebungsbedingungen (durch Staub, Zusatzmaterial etc.) bei der Lasermaterialbearbeitung berücksichtigt werden. Es darf kein Verhaken der Nadel auftreten.

Bei Verwendung einer längeren biegsamen Einzelnadel (um eine ausreichende Prozesstoleranz für eine beabsichtigte Höhenveränderung des HLG bei bestimmungsgemäßer HLG-Lasermaterialbearbeitung zu gewährleisten) muss überprüft werden, ob direkte oder direkt reflektierte Laserstrahlung an HLG-Abschirmungsteilen vorbei in den Raum propagiert und hierdurch kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. auch mit Punkt a).

e) *Validierung bei mechanischen Auflagesensoren (berührend)*
Zu verifizieren ist die Auslösung eines Schaltsignals bei einer entsprechenden Hubhöhe des Stößels bzw. korrespondierend mit einer Hubhöhe des HLG (Abheben und/oder Verkippen des HLG). Eine entsprechende Prüfanordnung ist zu erstellen.

Bewertung:

- Beurteilt werden muss, ob durch das Verkippen oder Abheben des HLG bei der entsprechenden Schalt-Hubhöhe des Stößels bzw. bei der Hubhöhe des HLG direkte oder direkt reflektierte Laserstrahlung an HLG-Abschirmungsteilen vorbei in den Raum propagiert und hierdurch kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. auch mit Punkt a). Dieses kann durch Kalkulationen oder Messungen (im Hinblick auf die propagierende Laserstrahlung) erfolgen.
- Bei den Prüfungen müssen auch kritische Umgebungsbedingungen (durch Staub, Zusatzmaterial etc.) bei der Lasermaterialbearbeitung berücksichtigt werden. Es darf kein Verhaken oder Blockieren der mechanischen Sensoren auftreten.
- Um eine ausreichende Prozesstoleranz für eine beabsichtigte Höhenveränderung des HLG/Stößelbewegung bei bestimmungsgemäßer HLG-Lasermaterialbearbeitung zu gewährleisten, sollte ein ausreichendes Signal-Rauschverhältnis (max. Hubhöhe bei bestimmungsgemäßem Betrieb im Vergleich zum Abheben) vorliegen.

f) *Validierung bei induktiven Auflagesensoren (berührungslos)*
Zu verifizieren ist die Auslösung eines Schaltsignals bei einem entsprechenden Schaltabstand bzw. korrespondierend mit einer entsprechenden Hubhöhe des HLG (Abheben oder Verkippen des HLG). Eine entsprechende Prüfanordnung ist zu erstellen.

Bewertung:

- Beurteilt werden muss, ob durch das Verkippen oder Abheben bei der entsprechenden Hubhöhe bzw. dem Schaltabstand direkte oder direkt reflektierte Laserstrahlung an HLG-Abschirmungsteilen vorbei in den Raum propagiert und hierdurch kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. mit Punkt a). Dieses kann durch Kalkulationen oder Messungen (im Hinblick auf die propagierende Laserstrahlung) erfolgen.
- Bezüglich des Schaltabstandes sind die für die Lasermaterialbearbeitung vorgesehenen Werkstoffe (bestimmungsgemäßer Betrieb) zu berücksichtigen. Der Einfluss des Reduktionsfaktors auf den Bemessungsschaltabstand muss bei der Bewertung berücksichtigt werden.
- Um eine ausreichende Prozesstoleranz (bei der HLG-Lasermaterialbearbeitung) zu gewährleisten, sollte ein ausreichendes Signal-Rauschverhältnis (max. Hubhöhe bei bestimmungsgemäßem Betrieb im Vergleich zum Abheben) vorliegen.

g) *Validierung bei kapazitiven Auflagesensoren (berührungslos)*
Zu verifizieren ist die Auslösung eines Schaltsignals bei einem entsprechenden Schaltabstand bzw. korrespondierend mit einer entsprechenden Hubhöhe des HLG

(Abheben oder Verkippen des HLG). Eine entsprechende Prüfanordnung ist zu erstellen.

Bewertung:

- Beurteilt werden muss, ob durch das Verkippen oder Abheben bei der entsprechenden Hubhöhe bzw. dem Schaltabstand direkte oder direkt reflektierte Laserstrahlung an HLG-Abschirmungsteilen vorbei in den Raum propagiert und hierdurch kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. mit Punkt a). Dieses kann durch Kalkulationen oder Messungen (im Hinblick auf die propagierende Laserstrahlung) erfolgen.
- Bezüglich des Schaltabstandes sind die für die Lasermaterialbearbeitung vorgesehenen Werkstoffe (bestimmungsgemäßer Betrieb) zu berücksichtigen. Der Einfluss des bearbeiteten Werkstoffs auf den Bemessungsschaltabstand (sicherer Schaltabstand) muss bei der Bewertung berücksichtigt werden.
- Bei den Prüfungen müssen auch kritische Umgebungsbedingungen (durch Feuchtigkeit, Fluide, Zusatzmaterial etc.) bei der Lasermaterialbearbeitung berücksichtigt werden.
- Um eine ausreichende Prozesstoleranz (bei der HLG-Lasermaterialbearbeitung) zu gewährleisten, sollte ein ausreichendes Signal-Rauschverhältnis (max. Hubhöhe bei bestimmungsgemäßem Betrieb im Vergleich zum Abheben) vorliegen.

h) *Validierung bei Ultraschall-Abstandssensoren (berührungslos)*

Unter Nutzung eines Ultraschallsensors im Rahmen einer Auflagekontrolle ist die Auslösung eines Schaltsignals bei einer entsprechenden Hubhöhe des HLG (Abheben oder Verkippen des HLG) zu verifizieren. Eine entsprechende Prüfanordnung ist zu erstellen.

Bewertung:

- Beurteilt werden muss, ob durch das Verkippen oder Abheben bei der entsprechenden Hubhöhe bzw. dem Schaltabstand direkte oder direkt reflektierte Laserstrahlung an HLG-Abschirmungsteilen vorbei in den Raum propagiert und hierdurch kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. mit Punkt a).
- Bei den Prüfungen müssen auch die vorherrschenden Umgebungsbedingungen (z. B. Gase und Gasgeschwindigkeiten im Messbereich) bei der Lasermaterialbearbeitung berücksichtigt werden,
- Um eine ausreichende Prozesstoleranz (bei der HLG-Lasermaterialbearbeitung) zu gewährleisten, sollte ein ausreichendes Signal-Rauschverhältnis (max. Hubhöhe bei bestimmungsgemäßem Betrieb im Vergleich zum Abheben) vorliegen.

Bei der Nutzung von Ultraschallsensoren in frei geführten Systemen ist die Auslösung eines Schaltsignals bei Über-/Unterschreitung eines gewissen Bearbeitungsabstands des HLG vom Werkstück zu verifizieren. Eine entsprechende Prüfanordnung zur Verifikation der Schaltabstände ist zu erstellen.

Bewertung:

- Beurteilt werden muss, ob durch die Änderung des Abstands des HLG zum Werkstück kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. mit Punkt a).
- Die übrigen Faktoren entsprechen den bei der Verwendung von Ultraschallsensoren im Rahmen einer Auflagekontrolle genannten Punkten.

i) *Validierung bei Neigungssensoren (berührungslos): Validierung der Grenzwertschalter*

Zu verifizieren ist die Auslösung eines Schaltsignals (Grenzwertschalter) bei einer zuvor eingestellten analogen Signalamplitude, die einem bestimmten Neigungswinkel entspricht.
Diesbezüglich ist eine Prüfanordnung zu erstellen, mit der der Funktionsträger definiert um eine bestimmte Achse geneigt werden kann.

Bewertung:

- Beurteilt werden muss, ob das Schaltsignal bei einem zuvor eingestellten Neigungswinkel ausgelöst wird.
- Bei der Nutzung eines Neigungssensors als ergänzender Sensor für eine Auflagekontrolle ist zu beurteilen, ob durch das Verkippen um einen bestimmten Winkel direkte oder direkt reflektierte Laserstrahlung an HLG-Abschirmungsteilen vorbei in den Raum propagiert und hierdurch kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. mit Punkt a).
- Bei der Nutzung eines Neigungssensors in frei geführten Systemen ist zu beurteilen, ob durch die Neigung des HLG bzw. der Strahlaustrittsebene Laserstrahlung derart in den Raum propagieren kann, dass kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. mit Punkt a).
- Um eine ausreichende Prozesstoleranz (bei der HLG-Lasermaterialbearbeitung) zu gewährleisten, sollte ein ausreichendes Signal-Rauschverhältnis (max. Neigungswinkel bei bestimmungsgemäßem Betrieb im Vergleich zum unbeabsichtigten Verkippen, z. B. Verhältnis 3:1) vorliegen.

j) *Validierung bei Beschleunigungssensoren/Gyroskopen (berührungslos): Validierung der Grenzwertschalter/Fensterdiskriminatoren*

Zu verifizieren ist die Auslösung eines Schaltsignals bei einer zuvor eingestellten analogen Signalamplitude, die einer bestimmten Beschleunigung entspricht.
Diesbezüglich ist eine Prüfanordnung zu erstellen, mit welcher der Funktionsträger in der/den für das HLG vorgesehen Betriebsart/-arten und mit den vorgesehenen Werkstücken benutzt wird.

Bewertung:

- Beurteilt werden muss, ob das Schaltsignal bei einer zuvor eingestellten Beschleunigung ausgelöst wird.
- Bei der Nutzung eines Beschleunigungssensors als ergänzender Sensor für eine Auflagekontrolle ist zu beurteilen, ob durch das Bewegen/den Vorschub um eine oder mehrere Achsen direkte oder direkt reflektierte Laserstrahlung an HLG-Abschirmungsteilen vorbei in den Raum propagiert und hierdurch kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. mit Punkt a).
- Bei der Nutzung eines Beschleunigungssensors in frei geführten Systemen ist zu beurteilen, ob durch das Bewegen/den Vorschub des HLG Laserstrahlung derart in den Raum propagieren kann, dass kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. mit Punkt a).
- Um eine ausreichende Prozesstoleranz (bei der HLG-Lasermaterialbearbeitung) zu gewährleisten, sollte ein ausreichendes Signal-Rauschverhältnis (z. B. 3:1) von im bestimmungsgemäßen Betrieb und im Fehlerfall auftretenden Beschleunigungen/Signalamplituden vorliegen.

k) *Validierung bei Temperatursensoren in der Strahlführungseinheit: Validierung der Grenzwertschalter/Fensterdiskriminatoren*

Zu verifizieren ist die Auslösung eines Schaltsignals bei Überschreiten einer definierten Temperatur an bestimmten Punkten der Abschirmung der Strahlführungseinheit bzw. korrespondierend mit einem gefährlichen Pegel einfallender Laserstrahlung auf der dem Laserstrahl zugewandten Seite der Strahlführungsabschirmung. Eine entsprechende Prüfanordnung ist zu erstellen.

Bewertung:
Die Beurteilung erfolgt analog zur DIN EN 60825-4:2009, Anhang C, Abschnitt C.2 für aktive Laserschutzwände.

- Beurteilt werden muss, ob das Schaltsignal bei der voreingestellten Temperatur ausgelöst wird. Der Temperatur-Schwellwert muss für die jeweiligen Sensorpositionen derart eingestellt sein, dass an keiner Stelle der überwachten Abschirmung innerhalb der Systemreaktionszeit der Laserstrahl eine gefährliche Schädigung der Abschirmung verursachen oder die Abschirmung durchdringen kann.
- Zu beurteilen ist, ob die Systemreaktionszeit kürzer ist als die passive Schutzdauer der Strahlführungsabschirmung für die entsprechend zuvor ermittelte Schutzgrenzbestrahlung (SGB) der Strahlführungsabschirmung.
- Die Ermittlung der passiven Schutzdauer erfolgt analog zur DIN EN 60825-4:2009, Anhang D. Die Schutzgrenzbestrahlung (*SGB*) errechnet sich aus der vorhersehbaren maximalen Bestrahlung (*VMB*) an der dem Laserstrahl zugewandten Seite der Strahlführungsabschirmung multipliziert mit einem Korrekturfaktor von 0,7: $SGB = 0{,}7 \times VMB_{getestet}$.

Anhang 6 Checklisten für Hersteller und Benutzer

Technische Schutzmaßnahmen gegen Laserstrahlung für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung

Die im Folgenden aufgeführte Checkliste für Hersteller und Benutzer von handgeführten Lasern zur Materialbearbeitung bietet auf der einen Seite für Hersteller eine Hilfestellung für eine sichere Konstruktion von HLG hinsichtlich der Lasersicherheit. Auf der anderen Seite ermöglicht sie Benutzern von HLG, sicherheitsrelevante Einrichtungen eines HLG zu verifizieren und richtig zu bedienen, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Die Checkliste ersetzt nicht die für Hersteller von HLG abzugebenden Konformitätserklärungen gemäß Europäischer Richtlinien. Aus der Erfüllung der Anforderungen gemäß der Checkliste lässt sich auch keine Vermutungswirkung ableiten.

Für den Aufbau und die Systematik der Checkliste stand die IEC/TR 60825-5 „Safety of laser products - Part 5: Manufacturer's checklist for IEC 60825-1“ Pate.

Es sei darauf hingewiesen, dass seit Juli 2010 die grundsätzlichen Anforderungen nach der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV) zu erfüllen sind.

Hersteller

ja nein

Anwendung/Parameter

Ist die beabsichtigte Anwendung des HLG definiert? ☐ ☐

Sind die zu bearbeitenden Werkstoffe/Werkstoffgruppen definiert? ☐ ☐

Sind die technischen Eigenschaften des HLG bekannt und dokumentiert? ☐ ☐

- Bauteilabmessungen
- Gewicht
- etc.

Sind die technischen Eigenschaften des Lasergeräts, das integraler Bestandteil des HLG wird oder mit dem das HLG verknüpft wird, bekannt? ☐ ☐

- Wellenlänge der Strahlung
- Betriebsart
- Ausgangsleistung
- ggf. Pulsparameter
- etc.

Sind die Parameter vorhandener Antriebe, die ggf. die Handführung unterstützen, bekannt? ☐ ☐

- Vorschubgeschwindigkeit (min., max.)
- Drehmoment

Schnittstellen

Sind die Schnittstellen des HLG bekannt und beschrieben? ☐ ☐

- Mechanische Schnittstellen
- Schnittstellen für Energie und Medien
  (Laserstrahlung, Gase, Flüssigkeiten, Strom,
  beim Prozess entstehende abzuführende Schadstoffe)
- Schnittstellen für die Steuerung (Sicherheitssteuerung)

ja nein

Ist die Dokumentation für das Lasergerät gemäß der DIN EN ISO 11252 erfolgt? ☐ ☐

Sind die Grenzen des HLG gemäß DIN EN ISO 12100-1 festgelegt? ☐ ☐

Verfahren der Risikominderung

Ist das iterative Verfahren der Risikominderung gemäß DIN EN ISO 12100-1 bzw. DIN EN ISO 14121-1 angewendet worden? ☐ ☐

- Identifizierung der Gefährdungen
- Risikoeinschätzung
- Risikobewertung

Wurden alle Betriebsbedingungen und der gesamte Lebenszyklus von HLG und ggf. externem Lasergerät, das mit dem HLG verbunden ist, berücksichtigt? ☐ ☐

Finden die Verfahren und Anforderungen der DIN EN ISO 11553-2 bei der Konstruktion des HLG Beachtung? ☐ ☐

Gefährdungen

Ist geprüft worden, in welchen Betriebsbedingungen gefährliche Laserstrahlung zugänglich werden kann? ☐ ☐

- Bestimmungsgemäßer Betrieb
- Wartung/Service
- Vorhersehbare Fehlerbedingungen

Ist analysiert worden, um welche Art von Laserstrahlung es sich handelt? ☐ ☐

- Direkte Laserstrahlung
- Gerichtet reflektierte Laserstrahlung
- Diffus gestreute Laserstrahlung

Ist das HLG als Lasereinrichtung gemäß der DIN EN 60825-1 aufgrund der zugänglichen Laserstrahlung einer Laserklasse zugeordnet worden und ist die Laserklasse dokumentiert? ☐ ☐

Bei HLG mit offener Bearbeitungszone: Ist die Gefährdung in typischen Abständen und Winkeln zur Strahlaustrittebene, in denen Körperteile exponiert werden können, bestimmt worden? ☐ ☐

- Bestimmung der vorhersehbaren Maximalbestrahlung (*VMB*)
- Vergleich mit den maximal zulässigen Bestrahlungen (MZB_{Auge}, MZB_{Haut})
- Bei bekannter *VMB* und *MZB*: Bestimmung der maximal erlaubten Expositionsdauer

Risikoeinschätzung

Ist für jede Gefährdung durch Laserstrahlung das Risiko eingeschätzt worden? ☐ ☐

- Schadensausmaß
- Eintrittswahrscheinlichkeit
  - Häufigkeit und/oder Dauer der Gefährdungsexposition
  - Möglichkeiten zur Vermeidung der Gefährdung

Maßnahmen zur Risikominderung	ja	nein
Wurde die Gefährdung durch Laserstrahlung durch angemessene Schutzmaßnahmen beseitigt oder wurden die Risiken soweit vermindert, wie dies praktisch umsetzbar ist? Erläuterung: Die ausschließliche Risikominderung durch Benutzerinformation (einschließlich organisatorischer Maßnahmen) ist nur in solchen Ausnahmefällen akzeptabel, in denen durch konstruktive und technische Schutzmaßnahmen keine wirtschaftlich vertretbare Risikominderung möglich ist.	☐	☐
<u>a) Passive Maßnahmen ohne sicherheitsrelevante Steuereinrichtungen</u>		
Sind konstruktive Maßnahmen getroffen worden, um die Gefährdung durch Laserstrahlung zu reduzieren? Führen Sie zur • Klassifizierung in eine niedrigere Laserklasse? • Verringerung der vorhersehbaren Maximalbestrahlung (VMB) in Abständen zum Strahlaustritt, in denen Körperteile exponiert werden können?	☐	☐
Ist geprüft worden, ob die HLG-Anwendung eine <u>vollständige</u> Einhausung des Bearbeitungsbereichs zulässt? (ggf. auch in Verbindung mit dem Werkstück)	☐	☐
Ist geprüft worden ob die HLG-Anwendung eine <u>partielle</u> Einhausung des Bearbeitungsbereichs zulässt? (ggf. mit Minimalspalten zum Werkstück)	☐	☐
Ist geprüft worden, ob mit lokalen Abschirmungen die Laserstrahlausbreitung in gewissen Winkeln zur Strahlaustrittsebene eingeschränkt werden kann?	☐	☐
Ist bei Verwendung von Abschirmungen sichergestellt, dass die Anforderungen der DIN EN 60825-4 erfüllt werden? • Ist die VMB bestimmt worden? • Ist die Schutzgrenzbestrahlung (SGB) der Abschirmung bekannt? • Ist das Inspektionsintervall festgelegt (T1, T2, T3)?	☐	☐
Ist sichergestellt, dass durch die durchgeführten Maßnahmen* keine neuen Gefährdungen entstanden sind? (*ohne sicherheitsrelevante Steuereinrichtungen)	☐	☐
Ist geprüft worden, ob das Risiko durch zugängliche Laserstrahlung neben passiven Maßnahmen mittels Integration sicherheitsrelevanter Steuereinrichtungen auf ein akzeptables Restrisiko vermindert werden kann?	☐	☐
<u>b) Sicherheitsrelevante Steuereinrichtungen</u> (sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - SRP/CS)		
Ist das Verfahren der DIN EN ISO 13849-1 zur Gestaltung und Verifikation von sicherheitsbezogenen Teilen von Steuerungen angewendet worden?	☐	☐
Sind die durch sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen auszuführenden Sicherheitsfunktionen identifiziert und dokumentiert? Sicherheitsfunktionen können u. a. sein: • Sicherheitsbezogene Stopp-Funktion durch Schutzeinrichtung (hier z. B. Laser-Stopp durch Auslösen der Auflagekontrolle) • Start-/Wiederanlauffunktion • Zustimmfunktion z. B. durch eine Zweihandschaltung • Vermeidung des unerwarteten Anlaufs (hier Freigabe der Laserstrahlung) • Steuerungsfunktionen und Betriebsartenwahl • Funktion zum manuellen Stillsetzen im Notfall • Funktion zur Beherrschung von Schwankungen, Verlust und Wiederkehr der Energiequellen (z. B. Unterspannungsschutz)	☐	☐

ja nein

Sind die Eigenschaften und der Beitrag jeder Sicherheitsfunktion zur Risikominderung festgelegt? ☐ ☐

Ist der erforderliche Performance Level (PL_r) für jede Sicherheitsfunktion ermittelt worden? ☐ ☐

Sind bei der Architektur der Sicherheitssteuerung die Gestaltungsleitsätze der DIN EN ISO 13849-1 beachtet worden? (u. a. Redundanz, Diversität) ☐ ☐

- In Bezug auf das HLG
- Bei Verknüpfung mit einem externen Lasergerät: auch in Bezug auf das Lasergerät

Ist für die erstellte Sicherheitssteuerung für jede Sicherheitsfunktion die erreichte Steuerungskategorie und der erreichte Performance Level (PL) bestimmt worden*? ☐ ☐

Anmerkung: Hilfestellung bei der Bestimmung bieten am Markt verfügbare Softwareprogramme (u. a. SISTEMA) an, die eine automatisierte Berechnung der Zuverlässigkeitswerte (wie PL) erlauben.

Ist verifiziert worden, ob für jede Sicherheitsfunktion die Bedingung $PL \geq PL_r$ erfüllt ist*? ☐ ☐

*Entscheidend ist, dass hier auch die Komponenten des Lasergerätes, die als sicherheitsbezogene Teile der Steuerung dienen (z. B. Strahlverschluss, Relais für Versorgungsspannung), einbezogen werden.

Falls für einige Sicherheitsfunktionen die Bedingung $PL \geq PL_r$ im ersten Schritt nicht erfüllt wurde, ist ein Redesign mit erneuter Ermittlung des PL erfolgt? ☐ ☐

Ist die Validierung der Systemreaktionszeit/Nachlaufzeit erfolgt? ☐ ☐

Zeit bis zur sicheren Laserstrahlisolierung oder -deaktivierung: Die Systemreaktionszeit muss kleiner sein als die maximal zulässige Expositionsdauer, ggf. zuzüglich einer Zeitdauer (Greifzeit), die benötigt wird, um mit bestimmten Körperteilen in den Bereich der Laserstrahlung zu gelangen: $t_{sys} \leq t_{exp} + t_{greif}$.

Verfügt das HLG (Klasse 3R, 3B und 4) über ausfallsichere oder redundante Laseremissions-Warneinrichtungen im Sichtfeld des Bedieners? ☐ ☐
Für die Betriebszustände:

- Laser-Bereit
- Laser-Emission oberhalb der Klasse 3R

Können die Laser-Emissions-Warneinrichtungen auch eindeutig erkannt werden, wenn der Bediener bestimmungsgemäßen Augenschutz trägt? ☐ ☐

Verfügt das HLG über eine Autorisierungskontrolleinrichtung am handgeführten Laserbearbeitungsgerät oder in seiner unmittelbaren Nähe, die den unautorisierten Betrieb verhindert (z. B. Schlüsselschalter)? ☐ ☐

Ist ein NOT-AUS-Taster (mind. Laser-Stopp oder auch Energietrennung) am HLG oder einer externen Einheit (z. B. Steuerbox) vorhanden, der schnell und leicht für den Bediener zugänglich ist? ☐ ☐

Hersteller + Benutzer
Allgemeines

ja nein

Sind die Anforderungen erfüllt, die sich aus der seit Juli 2010 geltenden Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV) für Hersteller und Benutzer ergeben? ☐ ☐

Sind die vom Hersteller dem Benutzer mitzuteilenden Benutzer- sowie Sicherheitsinformationen gem. DIN EN ISO 11553-2 mit dem Produkt geliefert worden? ☐ ☐
Beinhalten diese Informationen Angaben u. a. über:

- Schnittstellen
- Betriebsbedingungen
- Restrisiken
- Organisatorische Schutzmaßnahmen
- Persönliche Schutzmaßnahmen?

Ist eine entsprechende Kennzeichnung/Beschilderung des HLG* gemäß DIN EN 60825-1/DIN EN ISO 11553-2 erfolgt und vorhanden? ☐ ☐
(Klasseneinteilung, ggf. Warnzeichen W10, Leistungsdaten, etc.)
*Bei Verknüpfung mit einem externen Lasergerät gilt dieses auch in Bezug auf das Lasergerät.

Ist geprüft worden, ob aufgrund bestimmter Restrisiken z. B. durch Emission von UV-Strahlung oder Gefahrstoffen weitere Warnschilder erforderlich sind? ☐ ☐

Sicherheitseinrichtungen und ihre Praktikabilität in Verbindung mit HLG

Erfolgt die Bedienung vorteilhaft über eine Zweihand-Sicherheitsschaltung? ☐ ☐

Sind die Bedienungstaster für die Laserstrahlfreigabe vorteilhaft als 3-stufige Zustimmtaster ausgeführt? ☐ ☐

Wenn das HLG über eine Auflagekontrolle verfügt:

Ist bei HLG mit einer Auflagekontrolle sichergestellt, dass durch Verkippen oder Abheben des HLG bei der entsprechenden Hubhöhe des HLG bzw. entsprechend einem Schaltabstand des Sensors keine direkte oder direkt reflektierte Laserstrahlung an HLG-Abschirmungsteilen vorbei in den Raum propagiert und hierdurch kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. auch mit dem Punkt Systemreaktionszeit)? ☐ ☐

Ist bei HLG mit einer Auflagekontrolle sichergestellt, dass beim Bewegen der Laserstrahlaustrittsöffnung/des Bearbeitungsflecks über eine Werkstückkante oder über Werkstückaussparungen und eine damit verbundene örtlich und zeitlich differierende Auslösung eines Schaltsignals des Sensors keine direkte oder direkt reflektierte Laserstrahlung an HLG-Abschirmungsteilen oder Werkstückarealen vorbei in den Raum propagiert und hierdurch kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. auch mit dem Punkt Systemreaktionszeit)? ☐ ☐

ja nein

Wenn das HLG über Abstands- oder Lagesensoren verfügt:

Ist bei frei geführten HLG sichergestellt, dass durch die Abstands- oder Lageveränderung des HLG (z. B. Neigung) bzw. der Strahlaustrittsebene

- keine Laserstrahlung derart in den Raum propagieren kann,
- oder Extremitäten des Bedieners derart in den Strahlengang zwischen HLG und Werkstück gebracht werden können,

dass kritische Expositionen für den Bediener oder andere Personen auftreten können (vgl. auch mit dem Punkt Systemreaktionszeit)? ☐ ☐

Allgemein zur Funktion der Sensoren

Ist die Funktion der Sensoren auch bei kritischen Umgebungsbedingungen (durch z. B. Staub, Zusatzmaterial, Fluide, Feuchtigkeit, Gase, Gasgeschwindigkeiten, Streustrahlung), die bei der Lasermaterialbearbeitung auftreten können, gegeben? ☐ ☐

Gewähren die Sensoren eine ausreichende Prozesstoleranz (beabsichtigte Lage- oder Höhenveränderung des HLG bei bestimmungsgemäßer HLG-Lasermaterialbearbeitung) bzw. liegt ein ausreichendes Signal-Rauschverhältnis (z. B. max. Hubhöhe bei bestimmungsgemäßem Betrieb im Vergleich zur Fehlerbedingung „Abheben“) vor? ☐ ☐

Wenn das HLG über eine Strahlführungsüberwachung mittels Temperatursensoren verfügt:

Ist sichergestellt, dass ein Schaltsignal bei der voreingestellten Temperatur ausgelöst wird und der Temperatur-Schwellwert für die jeweiligen Sensorpositionen derart eingestellt ist, dass an keiner Stelle der überwachten Abschirmung innerhalb der Systemreaktionszeit der Laserstrahl eine gefährliche Schädigung der Abschirmung verursachen oder die Abschirmung durchdringen kann? ☐ ☐
Erläuterung: Die Beurteilung erfolgt analog zur DIN EN 60825-4:2009, Anhang C, Abschnitt C.2 für aktive Laserschutzwände.

Ist die Systemreaktionszeit kürzer als die passive Schutzdauer der Strahlführungsabschirmung für die entsprechend zuvor ermittelte Schutzgrenzbestrahlung (SGB) der Strahlführungsabschirmung? ☐ ☐
Erläuterung: Die Ermittlung der passiven Schutzdauer erfolgt analog zur DIN EN 60825-4:2009, Anhang D).

Anhang 7 Beispiel für die Anwendung der Software SISTEMA (IFA der DGUV 2010)

In diesem Abschnitt wird ein Beispiel für die praktische Anwendung des Software-Tools SISTEMA des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA der DGUV) in der Version von 2010 vorgestellt. Die Software kann von der Internetseite des IFA der DGUV nach Registrierung zur Installation herunter geladen werden.[3]
SISTEMA (**Si**cherheit von **Ste**uerungen an **Ma**schinen) bietet Hilfestellung bei der Bewertung der Sicherheit von Steuerungen im Rahmen der DIN EN ISO 13849-1. Das Windows-Tool bildet die Struktur der sicherheitsbezogenen Steuerungsteile auf der Basis der so genannten vorgesehenen Architekturen nach und berechnet Zuverlässigkeitswerte auf verschiedenen Detailebenen einschließlich des erreichten Performance Levels (*PL*).
Risikoparameter zur Bestimmung des erforderlichen Performance Level (PL_r), die Kategorie, die Maßnahmen gegen Fehler gemeinsamer Ursache (*CCF*) bei mehrkanaligen Systemen, die mittlere Bauteilgüte ($MTTF_d$) und die mittlere Testqualität (DC_{avg}) von Bauelementen bzw. Blöcken lassen sich Schritt für Schritt erfassen. Die Auswirkung jeder Parameteränderung auf das Gesamtsystem wird direkt angezeigt und kann als Report ausgedruckt werden.
Abbildung 1 zeigt, auf welche Schritte der iterativen Risikominderung sich die Unterstützung durch SISTEMA bezieht:

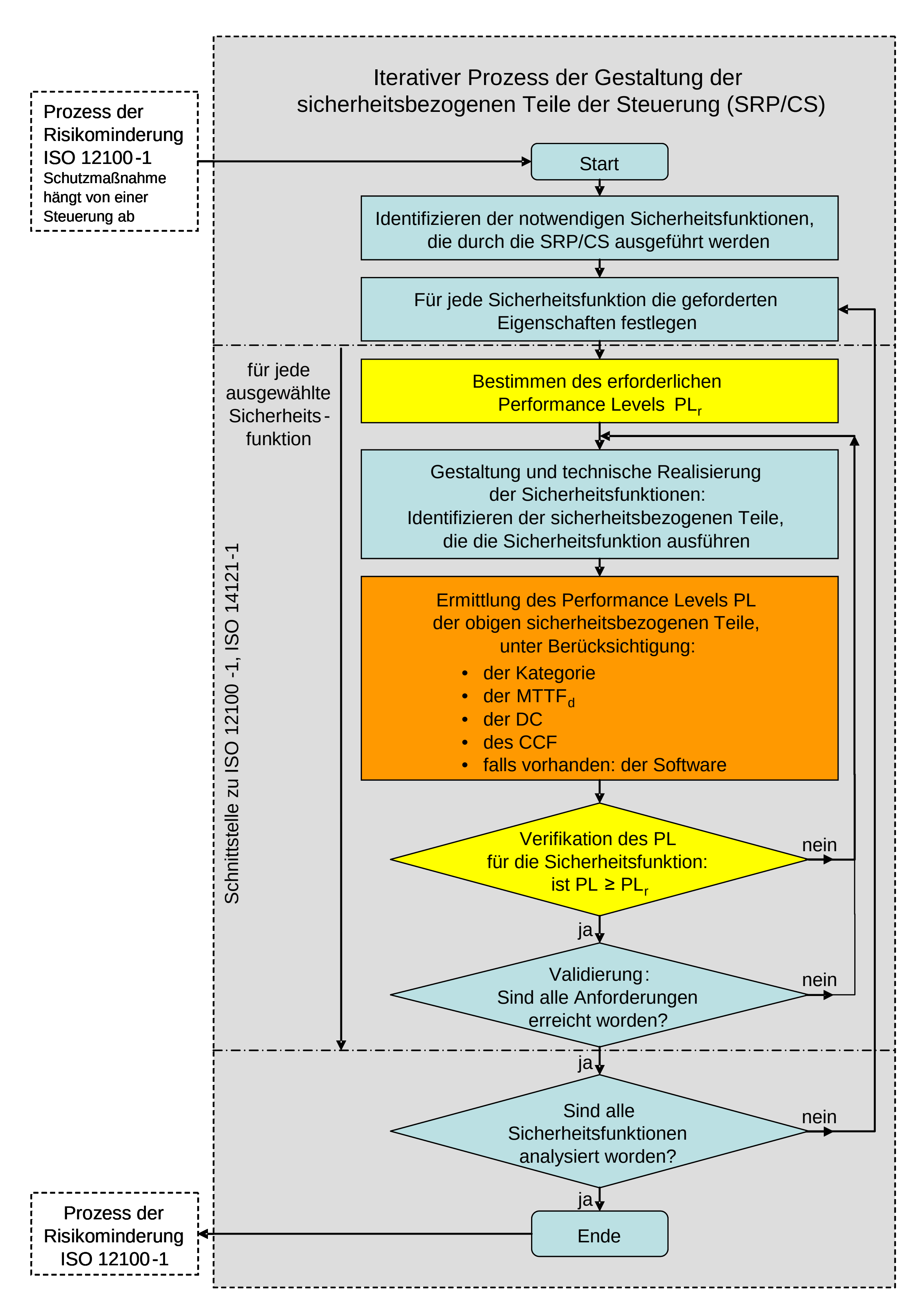
1 – Bestimmen des erforderlichen Performance Levels PL_r

2 – Ermittlung des Performance Levels *PL* der obigen sicherheitsbezogenen Teile

3 – Verifikation des *PL* für die Sicherheitsfunktion: Ist $PL \geq PL_r$?

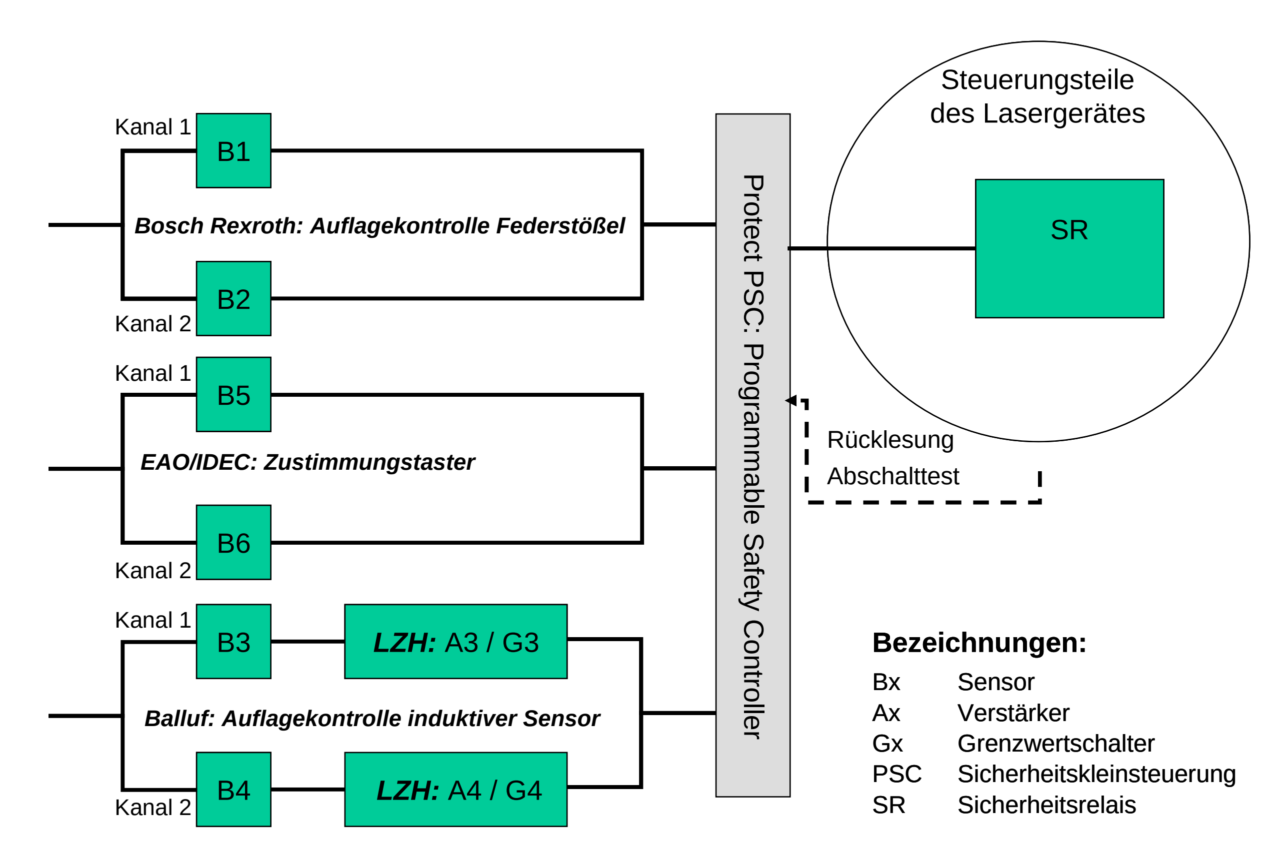
Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Bereich 2, der Ermittlung des Performance Levels.

[3] Internetseite des IFA der DGUV: Download von SISTEMA (Vers. 1.1.2 von 2010) www.dguv.de/ifa/de/pra/softwa/sistema/index.jsp



Anh. 7, Abb. 1 Iterativer Prozess der Gestaltung notwendiger Sicherheitsfunktionen, die durch die sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung ausgeführt werden, siehe auch Abb. 4.2. Gelb/orange hinterlegt sind die Schritte der Prozedur, auf die sich die Unterstützung durch SISTEMA bezieht.

Abbildung 2 zeigt am konkreten Beispiel eine sicherheitsbezogene Stoppfunktion.



Anh. 7, Abb. 2 Blockdiagramm einer sicherheitsbezogenen Stoppfunktion mit Komponenten unterschiedlicher Hersteller in Analogie zu Abb. 4.6

Als Beispiel wird hier eine Berechnung für ein handgeführtes Lasergerät als Auflagegerät für eine sicherheitsbezogene Stoppfunktion eingeleitet durch eine Schutzeinrichtung durchgeführt. Es handelt sich hierbei gemäß Abschnitt 5.2.2.1 um einen Laserstopp durch Isolierung oder Deaktivierung der Laserstrahlung (hier: Deaktivierung der Versorgungsspannung des Pumpmediums). Die Eingangsdaten entstammen den jeweiligen Herstellerinformationen bzw. Produktdatenblättern. Wo keine speziellen Daten verfügbar waren, wurden Daten aus Bibliotheken vergleichbarer Produkte herangezogen.
Die in den Eingabemasken beim SISTEMA-Tool eingetragenen technischen Angaben der Hersteller der Bauelemente (Angaben zu Gebrauchsdauer, Schaltungskategorie, Ausfällen etc.) und Kommentare werden nach Fertigstellung als Report ausgegeben. Der fertige Report ist nachfolgend wiedergegeben.

SISTEMA - Sicherheit von Steuerungen an Maschinen

Projektname: Handlasergerät als Auflagegerät



Checksumme: 80563910bcdf2e966befc3e517678082

Dateidatum: 21.12.2010 Reportdatum: 21.12.2010

PR Projektname: Handlasergerät als Auflagegerät

Autor:	Dirk Engelmann, BG ETEM Prüflabor Dresden (in Kooperation mit dem LZH)
Gefahrenstelle / Maschine:	Handlasergerät im Rahmen des Forschungsprojektes F2158 - BAuA, Dortmund
Dokumentation:	
Dokument:	
Dateiname:	C:\DATEN\Arbeitsschutz\AS-LZH\AS-Daten\SISTEMA\Projects\Handlasergerät als Auflagegerät2.ssm
Version der Software:	1.1.2
Version der Norm:	ISO 13849-1:2006, ISO 13849-2:2003
Checksumme:	80563910bcdf2e966befc3e517678082
Optionen:	☑ DC-Zwischenstufen zur Berechnung der PFH verwenden (genauer) ☐ MTTFd-Kappung für Kategorie 4 von 100 auf 2500 Jahre anheben
Status:	grün
Anmerkung:	Für das Projekt (bzw. seine untergeordneten Grundelemente) liegen keine Meldungen vor.

Enthaltene Sicherheitsfunktionen

SF Name: Not-Halt (Laser Stopp)

Gefordert: PLr d Erreicht: PL d PFH [1/h]: 1,81E-7 Status: grün

SISTEMA - Sicherheit von Steuerungen an Maschinen

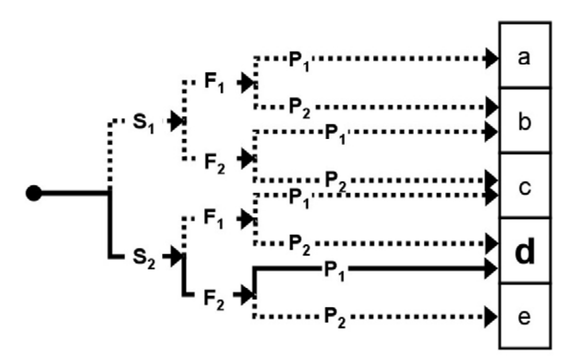


Projektname: Handlasergerät als Auflagegerät

Checksumme: 80563910bcdf2e966befc3e517678082

Dateidatum: 21.12.2010 Reportdatum: 21.12.2010

SF Sicherheitsfunktion: Not-Halt (Laser Stopp)

Typ der Sicherheitsfunktion:	Sicherheitsbezogene Stoppfunktion, eingeleitet durch eine Schutzeinrichtung
Auslösendes Ereignis:	- Öffnen des Zustimmschalters durch Loslassen des Bedieners der Handlaser-Bearbeitungskopfes im Betrieb - Öffnen eines oder mehrerer Positionsschalter (B1..B4) durch nicht bestimmungsgemäße Lageänderung des Handlaser-Bearbeitungskopfes im Betrieb
Reaktion:	- unverzögerte Abschalten der Spannungsversorung der Laserdiodenarrays mittels zwangsgeführter Sicherheitsrelais
Sicherer Zustand:	- keine Laserstrahlungsexposition ohne Bedienerwillen und/oder außerhalb der bestimmungsgemäßen Arbeitsposition des Handlaser-Bearbeitungskopfes
Dokumentation:	Projektbericht zum Forschungsprojekt F2158 (BAuA 2010)
Dokument:	
Erreichter PL:	d PFH [1/h]: 1,81E-7
PLr (durch Risikograph):	d
Schwere der Verletzung (S):	Schwere (üblicherweise irreversible) Verletzung, einschl. Tod
Häufigkeit / Dauer der Exposition (F):	Häufig bis dauernd / lange Dauer der Exposition
Möglichkeit der Vermeidung (P):	Möglich unter bestimmten Bedingungen
Risikograph:	
Status:	grün

Subsysteme:

SB Name: MPS_I

PL: e	PFH [1/h]: 5,37E-8
Kat.: 4	Gebrauchsdauer [a]: 20
DCavg [%]: 99 (High)	CCF Punkte: 65 (erfüllt)
MTTFd [a]: 50 (High)	

Dokumentation Subsystem

Dokumentation: MPS_I .. mechanical position sensor imput (dt. mechanische

SISTEMA - Sicherheit von Steuerungen an Maschinen

Projektname: Handlasergerät als Auflagegerät



Checksumme: 80563910bcdf2e966befc3e517678082

Dateidatum: 21.12.2010 Reportdatum: 21.12.2010

SF Sicherheitsfunktion: Not-Halt (Laser Stopp)

	Auflagesensoren mit zweikanaliger Eingabeblock-Stuktur gem. Kategorie 4 der DIN EN ISO 13849-1), Hersteller EAO/IDEC
Dokument:	

Kategorie Subsystem

Dokumentation / Begründung:	
Quelle (z.B. Norm) Kategorie:	
Datei:	
Anforderungen der Kategorie:	Grundlegende Sicherheitsprinzipien werden angewendet. [erfüllt] Bewährte Sicherheitsprinzipien werden angewendet. [erfüllt] Eine Ein-Fehlertoleranz ist gegeben. [erfüllt] Die Anhäufung von Fehlern führt nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion. [erfüllt] MTTFd ist High. [erfüllt] DCavg ist High. [erfüllt] Der erreichte Punktestand der CCF-Bewertung beträgt mindestens 65. [erfüllt]

Status / Hinweise Subsystem

Status:	grün

Kanäle / Testkanal:

CH Name: Kanal 1

MTTFd [a]: 50

Blöcke:

BL Name: **Sensor 1**

MTTFd [a]: 50 (High)	DC [%]: 99 (High)
Rate gefahrbringender Ausfälle [FIT]: 2283	Gebrauchsdauer [a]: 20

Dokumentation Block

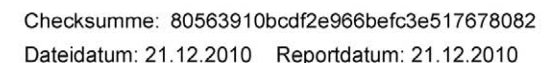
Dokumentation:	Druckschalter mit Federstößel Typ MPA 206R / Bosch Rexroth
Dokument:	

Diagnosedeckungsgrad Block

Dokumentation / Begründung:	

SISTEMA - Sicherheit von Steuerungen an Maschinen
Projektname: Handlasergerät als Auflagegerät





Checksumme: 80563910bcdf2e966befc3e517678082
Dateidatum: 21.12.2010 Reportdatum: 21.12.2010

SF Sicherheitsfunktion: Not-Halt (Laser Stopp)

Status / Hinweise Block

Status:	grün

Kanäle / Testkanal:

CH Name: Kanal 2

MTTFd [a]: 50

Blöcke:

BL Name: **Sensor 2**

MTTFd [a]: 50 (High)	DC [%]: 99 (High)
Rate gefahrbringender Ausfälle [FIT]: 2283	Gebrauchsdauer [a]: 20

Dokumentation Block

Dokumentation:	Druckschalter mit Federstößel Typ MPA 206R / Bosch Rexroth
Dokument:	

Diagnosedeckungsgrad Block

Dokumentation / Begründung:

Status / Hinweise Block

Status:	grün

Subsysteme:

SB Name: NTPS_I

PL: e	PFH [1/h]: 6,13E-8
Kat.: 4	Gebrauchsdauer [a]: 20
DCavg [%]: 99 (High)	CCF Punkte: 65 (erfüllt)
MTTFd [a]: 44,44 (High)	

Dokumentation Subsystem

Dokumentation:	NTPS_I .. non-tactile position sensor input (dt. berührungslose Positionssensoren mit zweikanaliger Eingabeblock-Stuktur gem. Kategorie 4 der DIN EN ISO 13849-1)
Dokument:	

Kategorie Subsystem

Dokumentation / Begründung:

Quelle (z.B. Norm) Kategorie:

SISTEMA - Sicherheit von Steuerungen an Maschinen

Projektname: Handlasergerät als Auflagegerät



Checksumme: 80563910bcdf2e966befc3e517678082

Dateidatum: 21.12.2010 Reportdatum: 21.12.2010

SF Sicherheitsfunktion: Not-Halt (Laser Stopp)

Datei:

Anforderungen der Kategorie:

- Grundlegende Sicherheitsprinzipien werden angewendet. [erfüllt]
- Bewährte Sicherheitsprinzipien werden angewendet. [erfüllt]
- Eine Ein-Fehlertoleranz ist gegeben. [erfüllt]
- Die Anhäufung von Fehlern führt nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion. [erfüllt]
- MTTFd ist High. [erfüllt]
- DCavg ist High. [erfüllt]
- Der erreichte Punktestand der CCF-Bewertung beträgt mindestens 65. [erfüllt]

Status / Hinweise Subsystem

Status: grün

Kanäle / Testkanal:

CH Name: Kanal 1

MTTFd [a]: 44,44

Blöcke:

BL Name: **Sensor 1**

MTTFd [a]: 100 (High) DC [%]: 99 (High)

Rate gefahrbringender Ausfälle [FIT]: 1141 Gebrauchsdauer [a]: 20

Dokumentation Block

Dokumentation: Induktiver Näherungssensor
Typ BES 516-3005-G-E4-C-PU-02 / PNP
Fa. Balluff

Dokument:

Diagnosedeckungsgrad Block

Dokumentation / Begründung:

Status / Hinweise Block

Status: grün

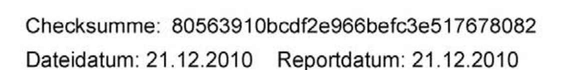
Blöcke:

BL Name: **Signalaufbereitung 1**

MTTFd [a]: 80 (High) DC [%]: 99 (High)

SISTEMA - Sicherheit von Steuerungen an Maschinen
Projektname: Handlasergerät als Auflagegerät




Checksumme: 80563910bcdf2e966befc3e517678082
Dateidatum: 21.12.2010 Reportdatum: 21.12.2010

SF Sicherheitsfunktion: Not-Halt (Laser Stopp)

Rate gefahrbringender Ausfälle [FIT]: 1426 Gebrauchsdauer [a]: 20

Dokumentation Block

Dokumentation: Signalverstärker und Schwellwertschalter
LZH - Eigenbau

Dokument:

Diagnosedeckungsgrad Block

Dokumentation / Begründung:

Status / Hinweise Block

Status: grün

Kanäle / Testkanal:

CH Name: Kanal 2

MTTFd [a]: 44,44

Blöcke:

BL Name: **Sensor 2**

MTTFd [a]: 100 (High) DC [%]: 99 (High)

Rate gefahrbringender Ausfälle [FIT]: 1141 Gebrauchsdauer [a]: 20

Dokumentation Block

Dokumentation: Induktiver Näherungssensor
Typ BES 516-3005-G-E4-C-PU-02 / PNP
Fa. Balluff

Dokument:

Diagnosedeckungsgrad Block

Dokumentation / Begründung:

Status / Hinweise Block

Status: grün

Blöcke:

BL Name: **Signalaufbereitung 2**

MTTFd [a]: 80 (High) DC [%]: 99 (High)

Rate gefahrbringender Ausfälle [FIT]: 1426 Gebrauchsdauer [a]: 20

Dokumentation Block

SISTEMA - Sicherheit von Steuerungen an Maschinen

Projektname: Handlasergerät als Auflagegerät



Checksumme: 80563910bcdf2e966befc3e517678082

Dateidatum: 21.12.2010 Reportdatum: 21.12.2010

SF Sicherheitsfunktion: Not-Halt (Laser Stopp)

Dokumentation:	Signalverstärker und Schwellwertschalter LZH - Eigenbau
Dokument:	

Diagnosedeckungsgrad Block

Dokumentation / Begründung:	

Status / Hinweise Block

Status:	grün

Subsysteme:

SB Name: THB

PL: e	PFH [1/h]: 2,47E-8
Kat.: 4	Gebrauchsdauer [a]: 20
DCavg [%]: 99 (High)	CCF Punkte: 65 (erfüllt)
MTTFd [a]: 100 (High)	

Dokumentation Subsystem

Dokumentation:	Zustimmungstaster (THB := two-hand button) gem. Kategorie 4 der DIN EN ISO 13849-1
Dokument:	

Kategorie Subsystem

Dokumentation / Begründung:	
Quelle (z.B. Norm) Kategorie:	
Datei:	
Anforderungen der Kategorie:	Grundlegende Sicherheitsprinzipien werden angewendet. [erfüllt] Bewährte Sicherheitsprinzipien werden angewendet. [erfüllt] Eine Ein-Fehlertoleranz ist gegeben. [erfüllt] Die Anhäufung von Fehlern führt nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion. [erfüllt] MTTFd ist High. [erfüllt] DCavg ist High. [erfüllt] Der erreichte Punktestand der CCF-Bewertung beträgt mindestens 65. [erfüllt]



SISTEMA - Sicherheit von Steuerungen an Maschinen
Projektname: Handlasergerät als Auflagegerät



Checksumme: 80563910bcdf2e966befc3e517678082
Dateidatum: 21.12.2010 Reportdatum: 21.12.2010

SF Sicherheitsfunktion: Not-Halt (Laser Stopp)

Diagnosedeckungsgrad Subsystem

Dokumentation / Begründung:

Status / Hinweise Subsystem

Status: grün

Kanäle / Testkanal:

CH Name: Kanal 1

MTTFd [a]: 132,6

Blöcke:

BL Name: **THB1**

MTTFd [a]: 132,6 (High)

Rate gefahrbringender Ausfälle [FIT]: 860, Gebrauchsdauer [a]: 20

Dokumentation Block

Dokumentation: B(10[d]) = 100.000; d(op) = 220 Tage; h(op) = 8 h; t(Zyklus) = 210 sec => MTTF(d) = 33,15 a (High)
[s. "MTTFd"-Folder]

Typ HE1G-21SM
Fa. EAO/IDEC

Dokument:

Status / Hinweise Block

Status: grün

Kanäle / Testkanal:

CH Name: Kanal 2

MTTFd [a]: 132,6

Blöcke:

BL Name: **THB2**

MTTFd [a]: 132,6 (High)

Rate gefahrbringender Ausfälle [FIT]: 860, Gebrauchsdauer [a]: 20

Dokumentation Block

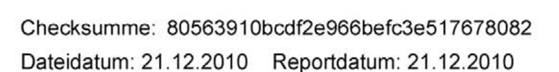
Dokumentation: B(10[d]) = 100.000; d(op) = 220 Tage; h(op) = 8 h; t(Zyklus) = 210 sec => MTTF(d) = 33,15 a (High)
[s. "MTTFd"-Folder]

Typ HE1G-21SM
Fa. EAO/IDEC

SISTEMA - Sicherheit von Steuerungen an Maschinen

Projektname: Handlasergerät als Auflagegerät




Checksumme: 80563910bcdf2e966befc3e517678082
Dateidatum: 21.12.2010 Reportdatum: 21.12.2010

SF Sicherheitsfunktion: Not-Halt (Laser Stopp)

Dokument:

Status / Hinweise Block

Status:	grün

Subsysteme:

SB Name: PROTECT PSC safety PLC, function: 2 inputs to 1 output (Cat 4/ PL e)

PL: e	PFH [1/h]: 1,64E-8
Kat.: 4	Gebrauchsdauer [a]: 20

Dokumentation Subsystem

Dokumentation:	Overall classification for a safety function: - with TWO 2-channel inputs acting - to ONE 2-channel output Further information available upon request.
Dokument:	

Performance Level Subsystem

Dokumentation / Begründung:	PFH value applies for 2-channel applications. Diverging applications refer to product documentation / upon request.

Kategorie Subsystem

Dokumentation / Begründung:	
Quelle (z.B. Norm) Kategorie:	
Datei:	
Anforderungen der Kategorie:	Da die Kategorie durch den Hersteller angegeben wird, verantwortet dieser auch die Erfüllung der Anforderungen.

Status / Hinweise Subsystem

Status:	grün

Subsysteme:

SB Name: SR

PL: e	PFH [1/h]: 2,47E-8
Kat.: 4	Gebrauchsdauer [a]: 20
DCavg [%]: 99 (High)	CCF Punkte: 65 (erfüllt)
MTTFd [a]: 100 (High)	

Dokumentation Subsystem

SISTEMA - Sicherheit von Steuerungen an Maschinen

Projektname: Handlasergerät als Auflagegerät



Checksumme: 80563910bcdf2e966befc3e517678082

Dateidatum: 21.12.2010 Reportdatum: 21.12.2010

SF Sicherheitsfunktion: Not-Halt (Laser Stopp)

Dokumentation:	SR .. safety relais (dt. zwangsgeführtes Sicherheitsrelais) B(10[d]) = 400.000; d(op) = 220 Tage; h(op) = 8 h; t(Zyklus) = 210 sec => MTTF(d) = 132,6 a (High) [s. "MTTFd"-Folder]
Dokument:	

Kategorie Subsystem

Dokumentation / Begründung:	
Quelle (z.B. Norm) Kategorie:	
Datei:	
Anforderungen der Kategorie:	Grundlegende Sicherheitsprinzipien werden angewendet. [erfüllt] Bewährte Sicherheitsprinzipien werden angewendet. [erfüllt] Eine Ein-Fehlertoleranz ist gegeben. [erfüllt] Die Anhäufung von Fehlern führt nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion. [erfüllt] MTTFd ist High. [erfüllt] DCavg ist High. [erfüllt] Der erreichte Punktestand der CCF-Bewertung beträgt mindestens 65. [erfüllt]

Diagnosedeckungsgrad Subsystem

Dokumentation / Begründung:	

Status / Hinweise Subsystem

Status:	grün
Hinweise [Hinweis-Status]:	Die MTTFd des Subsystems wurde von ursprünglich 132,6 auf 100 a gekürzt. Für ein Substystem ist 100 a die maximal zulässige mittlere Zeit bis zum gefahrbringenden Ausfall. [grün]

SISTEMA - Sicherheit von Steuerungen an Maschinen

Projektname: Handlasergerät als Auflagegerät



Checksumme: 80563910bcdf2e966befc3e517678082

Dateidatum: 21.12.2010 Reportdatum: 21.12.2010

HAFTUNGSAUSSCHLUSS

Die Software wurde gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik sorgfältig erstellt. Sie wird dem Nutzer unentgeltlich zur Verfügung gestellt.

Die Benutzung der Software erfolgt auf eigene Gefahr. Eine Haftung - gleich aus welchem Rechtsgrund - ist, soweit gesetzlich zulässig, ausgeschlossen. Insbesondere für Sach- und Rechtsmängel der Software, sowie der damit zusammenhängenden Dokumentationen und Informationen wird - vor allem im Hinblick auf deren Richtigkeit, Fehlerfreiheit, Freiheit von Schutz- und Urheberrechten Dritter, Aktualität, Vollständigkeit und/oder Verwendbarkeit - außer bei Vorsatz oder Arglist - nicht gehaftet.

Das IFA ist bemüht, seine Homepage virenfrei zu halten, gleichwohl kann keine Virenfreiheit der zur Verfügung gestellten Software und Informationen zugesichert werden. Dem Nutzer wird daher empfohlen, vor dem Herunterladen von Software, Dokumentationen oder Informationen selbst für angemessene Sicherheitsvorkehrungen und Virenscanner zu sorgen.

KONTAKT

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)
Fachbereich 5: Unfallverhütung - Produktsicherheit
Alte Heerstr. 111, 53757 Sankt Augustin
E-Mail: sistema@dguv.de
www.dguv.de/ifa (Webcode: d3022)

Datum, Unterschrift Autor Datum, Unterschrift Prüfer